



HAL
open science

Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie

Corinne Alonso

► **To cite this version:**

Corinne Alonso. Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie. Micro et nanotechnologies/Microélectronique. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2003. tel-00012019

HAL Id: tel-00012019

<https://theses.hal.science/tel-00012019>

Submitted on 23 Mar 2006

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITÉ PAUL SABATIER – TOULOUSE III

M É M O I R E

En vue de l'obtention de
L'HABILITATION À DIRIGER LES RECHERCHES

Présentée et Soutenue
Par

Corinne ALONSO

Le 12 Décembre 2003

Titre :

**Contribution à l'optimisation, la gestion et
le traitement de l'énergie**

Jury

Président	P. DESTRUEL
Rapporteurs	F. COSTA B. MULTON A. RUFER
Examineurs	J. ALZIEUX Y. CHÉRON P. MALBRANCHE J-C. MULLER
Directeurs de recherche	A. MARTINEZ L. MARTINEZ-SALAMÉRO

A Mes Parents

A Vincent

Avant Propos.

L'Habilitation à Diriger des Recherches a été pour moi une occasion d'effectuer une synthèse des travaux de recherche que j'ai pu mener au sein du LAAS-CNRS depuis 1996, année de ma nomination en tant que Maître de Conférences à l'Université Paul Sabatier. Bien entendu, tous les travaux présentés dans ce manuscrit n'auraient pas d'existence s'il n'y avait pas eu un environnement propice. Je tiens à remercier comme il se doit tout ceux qui ont contribué de prêt ou de loin à ces travaux de recherche, en en premier lieu Messieurs Alain Costes, Jean-Claude Laprie et enfin Malik Ghallab, Directeurs successifs du laboratoire depuis mon arrivée.

Je remercie Messieurs Pierre Destruel, Professeur à l'Université Paul Sabatier, François Costa, Professeur à l'IUFM de Créteil, Bernard Multon, Professeur à l'ENS de Cachan antenne de Bretagne, Alfred Rufer, Professeur de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Jean Alzieux, Chargé de Recherche CNRS détaché à EDF, Yvon Chéron, Directeur de Recherche au LEEI de Toulouse, Philippe Malbranche, Directeur du CEA-GENEC et Jean-Claude Muller, Ingénieur de Recherche au laboratoire PHASE, pour m'avoir fait l'honneur de participer à mon jury.

J'exprime ici ma profonde reconnaissance à mes deux directeurs de recherche. Commençons par le célèbre Augustin Martinez, pour m'avoir aiguillé et aiguillonné toutes ces années dans ce domaine de recherche novateur et ingrat. Qu'il soit remercié pour sa gentillesse, sa clairvoyance, ses « Magnague » mais pas ses cigarettes ! Pour Luis Martinez-Salamero qui a ouvert la voie d'une collaboration de très longue durée entre Tarragone et le LAAS-CNRS, qu'il soit remercié pour sa gentillesse, son amitié ainsi que de toutes les discussions scientifiques menées avec ardeur même à des heures non syndicales pour des français.

J'ai ici une pensée spéciale pour Jean-Claude Marpinard, à l'origine de la plupart de mes travaux de recherche et qui a eu l'amabilité de m'accueillir alors que j'étais « toute petite ». Qu'il en soit ici chaleureusement remercié.

Je tiens à remercier également l'ensemble des étudiants et des doctorants qui ont, au fil du temps, participé à la mise en œuvre de ces travaux, notamment Hugo Valderrama-Blavi, Mohammed Firas-Shraif, Angel Cid-Pastor et Alain Salles.

Une pensée aux deux Bruno, Jammes et Estibals, qui ont la lourde tâche de me supporter au quotidien, en tant que voisins de bureau... Mais qui m'en font baver en retour avec Leurs Citroën !

Un grand merci aux membres des groupes de recherche M2I puis TMN et MIS, en particulier à Gabriel Blasquez, Henri Camon, Anne-Marie Gué, Philippe Ménini, François Olivié, Gérard Sarrabayrouse, Pierre Temple-Boyer. Et une pensée aussi pour tout mes futurs collègues de CIP !

Enfin, j'exprime toute ma gratitude à mes parents qui m'ont tant soutenu depuis mes études jusqu'à maintenant.

Table des matières.

INTRODUCTION GENERALE.	1
CHAPITRE 1. PROBLEMATIQUE DES TRAVAUX.	5
I.1 Les énergies renouvelables aujourd'hui	5
I.2 L'énergie photovoltaïque	7
I.2.1 Généralités	7
I.2.2 L'effet photovoltaïque	8
I.2.2.1 Brefs rappels sur l'énergie solaire	8
I.2.2.2 Historique et synthèse des cellules photovoltaïques	9
I.2.3 La jonction PN utilisée comme capteur PV	10
I.2.3.1 Comportement	10
I.2.3.2 Modélisation	11
I.2.4 Le générateur photovoltaïque (PV)	11
I.2.4.1 Constitution	11
I.2.4.2 Propriétés	12
I.2.4.3 Comportement en température sous divers éclairagements homogènes	13
I.2.4.4 Influence de l'éclairement inhomogène	14
I.3 Introduction des travaux menés dans ce domaine	15
I.3.1 Utilisation d'un générateur PV	15
I.3.2 Notion de rendements	16
I.3.2.1 Rendement de conversion d'une cellule PV	17
I.3.2.2 Rendement d'une chaîne de conversion de puissance	18
I.4 Axes de recherches développés	20
I.5 Contexte de ces travaux dans les programmes de recherches	21
CHAPITRE 2. GESTION ET OPTIMISATION DES SYSTEMES PHOTOVOLTAIQUES.	23
II.1 Position du problème	23
II.1.1 Les chaînes de conversion photovoltaïque	23
II.1.2 Cahier des charges	24
II.2 Etudes et réalisations de convertisseurs élémentaires	26
II.2.1 Exemple de conception et réalisation d'un convertisseur DC-DC	26
II.2.1.1 Rappels du cahier des charges	26
II.2.1.2 Dimensionnement de L et choix du matériau magnétique	27

II.2.1.3 Choix de la technologie des condensateurs	28
II.2.1.4 Evaluation des pertes totales	30
II.2.2 Résultats expérimentaux	30
II.2.3 Perspectives d'études	30
II.3 Concept de MPPT	33
II.3.1 Fonctionnement d'un générateur MPPT à sa puissance maximale	33
II.3.2 Rappel des différents types de MPPT rencontrés dans la littérature	35
II.3.2.1 Les premières commandes MPPT	35
II.3.2.2 Les commandes MPPT destinées aux applications spatiales	36
II.3.2.3 Les commandes MPPT destinées à algorithmes performants	37
II.3.2.4 Les commandes MPPT numériques performantes	37
II.3.3 Synthèse	38
II.4 Travaux menés sur les commandes MPPT	39
II.4.1 Synthèse d'une MPPT analogique à haut rendement	39
II.4.2 Perspectives	40
II.5 Association. Modularité	40
II.5.1 Notion de source de puissance	40
II.5.2 Concept du AC-LFR	41
II.5.3 La structure NAC-LFR	43
II.6 Conclusions et perspectives	43
CHAPITRE 3. CARACTERISATION ET EVOLUTION DES SYSTEMES ENERGETIQUES DE CONVERSION.	45
III.1 Introduction. Position du sujet	45
III.2 Développement d'un site de démonstration	46
III.2.1 Historique	46
III.2.2 Cahier des charges	47
III.2.2.1 Considérations générales	47
III.2.2.2 Systèmes de puissance pouvant être testés	48
III.2.2.3 Grandeurs mesurées et conditions de mesures	48
III.2.2.4 Choix de la fréquence d'échantillonnage	49
III.2.3 Principe d'acquisition de mesures	50
III.2.3.1 Choix du type d'acquisition et de transfert des données	50
III.2.3.2 Traitement des données et exploitation des résultats	50
III.2.3.3 Exemple de comparaison entre différents chargeurs de batterie	55
III.2.4 Synthèse et perspectives	56
III.3 Couplage avec l'énergie éolienne et stockage	57
III.3.1 Problématique du couplage	57
III.3.1.1 Contexte des travaux	57
III.3.1.2 Situation des travaux fin 2003	58
III.3.2 L'énergie éolienne	58
III.3.2.1 Problématique	58
III.3.2.2 Production d'énergie éolienne et conversion en électricité	59

III.3.2.3	Présentation de la chaîne élémentaire de conversion éolienne	61
III.3.2.4	Perspectives du modèle éolien	65
III.3.3	Etude sur le couplage éolien-PV	65
III.3.3.1	Modélisation sous MATLAB-SIMULINK	66
III.3.3.2	Couplage des deux chaînes	68
III.3.3.3	Couplage sur la batterie	70
III.3.3.4	Couplage par la MPPT	71
III.3.3.5	Conclusion et perspectives sur le couplage	72
III.3.4	Synthèse et perspectives	73
III.4	La problématique du stockage	74
III.4.1	Cadre des recherches	74
III.4.2	Différents types de cycles de charge d'une batterie Pb	75
III.4.3	Influence de la température sur la charge d'une batterie plomb-acide	75
III.4.3	Etudes en cours et perspectives	76
CHAPITRE 4.	MICRO-CONVERTISSEURS INTEGRES.	77
IV.1	Introduction.	77
IV.1.1	Généralités	77
IV.1.2	Situation des travaux dans les programmes de recherche	78
IV.2	Identification du domaine de recherche.	79
IV.2.1	Identification des besoins	79
IV.2.2	Problématique des microsystemes	80
IV.2.2.1	Généralités sur les microsystemes	80
IV.2.2.2	Actionnement des microsystemes	81
IV.3	Problématique de l'intégration de puissance	83
IV.3.1	Source d'énergie	83
IV.3.2	Etage de conversion	83
IV.3.3	Aperçu des dernières avancées des systèmes de conversion intégrés	85
IV.3.3.1	Les composants actifs	85
IV.3.3.2	Cas des condensateurs	86
IV.3.3.3	Cas des inductances	88
IV.3.4	Synthèse des verrous technologiques	92
IV.4	Travaux sur la réalisation d'éléments inductifs	92
IV.4.1	Modélisation de l'inductance	93
IV.4.2	Influence de la forme de l'inductance sur les propriétés électriques	95
IV.4.3	Répartition de la densité de courant dans le conducteur	97
IV.4.4	Etude électrothermique	97
IV.4.5	Le nano-imprint comme technique de réplcation	99
IV.4.6	La croissance d'or 3D	100
IV.4.7	Synthèse	103
IV.5	Perspectives	103
IV.5.1	Généralités	103
IV.5.2	Approche envisagée pour réaliser une alimentation intégrée	105

IV.5.3 Structures nouvelles de conversion pour l'intégration	107
CONCLUSION GENERALE.	109
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.	113

Introduction générale.

Aujourd'hui, les énergies renouvelables deviennent progressivement des énergies à part entière, rivalisant avec des énergies fossiles du point de vue *coût* et *performance de production*. Cependant, leur système de conversion de l'énergie en électricité souffre souvent d'un manque d'optimisation qui en fait encore des systèmes trop chers, et présentant des déficiences importantes en rendement et en fiabilité. Pour cela, bien qu'il existe de plus en plus de travaux de recherches prouvant la viabilité de sources comme, par exemple, l'énergie photovoltaïque (PV) ou l'énergie éolienne, beaucoup de réticences existent encore pour installer ces systèmes à grande échelle, autant en production de masse que chez des particuliers.

Bien que l'énergie photovoltaïque soit connue depuis de nombreuses années comme source pouvant produire de l'énergie électrique allant de quelques milliwatts au mégawatt, elle reste encore à un stade anecdotique et ne se développe pas encore dans de grandes proportions, notamment à cause du coût trop élevé des capteurs. De plus, plusieurs problèmes techniques doivent être résolus pour amener ces systèmes à un degré de maturité suffisant pour en faire des produits industriels à part entière. Les problèmes concernent autant le matériau de conversion photovoltaïque, qui reste cher à synthétiser, que la chaîne de conversion électrique, qui présente beaucoup de pertes lors d'utilisations mal adaptées. Beaucoup de lois de commande spécifiques permettant d'optimiser la production d'énergie photovoltaïque présentent également quelques défaillances.

Sur la partie « Matériau », beaucoup d'équipes de recherche travaillent depuis de nombreuses années pour obtenir des rendements élevés associés à des prix de réalisation relativement bas et une tenue des performances en vieillissement sur des durées importantes (*10 à 30 ans*). A côté des autres laboratoires français, le LAAS a choisi d'apporter sa contribution sur la partie « Système » de la chaîne de conversion. Ainsi, en 1996, des études ont été relancées dans ce domaine sous l'impulsion du Professeur Augustin Martinez. Nous avons alors pu constater les problèmes de non-optimisation électrique des systèmes existants et le manque d'équipes de recherche s'intéressant à ces axes qui constituent pourtant la clé essentielle pour un développement à grande échelle. Les points à résoudre se situaient alors autant sur la partie conversion électrique que thermique du générateur PV. Les premiers travaux entrepris au sein du laboratoire se sont donc tout naturellement focalisés sur l'optimisation de la partie conversion électrique. Pour cela, en s'appuyant sur la création, le développement et l'évolution constante du site de démonstration de 1kW crête photovoltaïque entièrement instrumenté au sein même du LAAS, nous avons développé différentes architectures de

conversion électriques dédiées au PV, notamment en collaboration avec l'Université Rovira i Virgili de Tarragone (*URV*) et l'Université Polytechnique de Catalogne de Barcelone (*UPC*). Toutes s'appuyaient sur des lois de commandes de types MPPT ; l'une d'entre elles a d'ailleurs été développée par nos soins et fait l'objet d'un brevet CNRS, qui est aujourd'hui étendu à plusieurs pays. Par ce biais, un grand nombre de progrès ont été accompli concernant notamment le rendement de conversion et la fiabilité de la chaîne. Le chapitre 2 de ce mémoire rappelle les principales avancées que nous avons accomplis dans ce domaine.

Très rapidement, nous nous sommes aperçu que, même si les systèmes de production photovoltaïque faisaient des progrès considérables, ils ne pourraient à eux seuls représenter une source d'énergie fiable. En effet, les variations de production étant fortement couplées aux données météorologiques, la production ne pouvait pas forcément être assurée lorsque l'utilisation s'en faisait sentir. Nous avons donc pensé à coupler les systèmes PV à d'autres sources d'énergie ainsi qu'à des moyens de stockage. L'éolien paraissait prometteur car il était souvent complémentaire en production. En effet, les vents soufflent plus fort la nuit et la production d'énergie éolienne aurait pu compenser, dans ces horaires, celle inexistante du PV.

Les premières difficultés qu'il a fallu résoudre consistaient en l'évaluation des puissances qu'il était judicieux de coupler. En effet, d'un côté, il est encore aujourd'hui difficile de créer des centrales PV de puissance supérieures à quelques dizaines de kilowatts. D'un autre côté, l'éolien a souvent des aérogénérateurs de puissance supérieure à 500kW. Dans ce contexte, étant données l'ampleur et la complexité des études à mener, nous avons établi de nouvelles collaborations avec deux laboratoires de recherche français, le LEEI et le GREAH, à travers le programme ECODEV/CNRS ADEME. Ces deux laboratoires présentaient des études antérieures sur les énergies renouvelables qui étaient complémentaires sur les compétences déjà acquises sur l'éolien et le stockage et qui pouvaient ainsi renforcer les moyens à mettre en œuvre dans les études sur le couplage entre l'énergie PV et l'éolien pour des réseaux autonomes de faibles puissances. Ce nouveau regroupement s'est concrétisé par des contrats de recherche obtenus en 2000, s'appuyant sur la création du réseau thématique euro-régional nommé PERDURE, accompagné du contrat de recherche COSEPE. Ces travaux se poursuivent actuellement par la validation expérimentale d'une chaîne de conversion mixte sur le site du LAAS. Aujourd'hui, la maturité des études sur le couplage montre qu'il faut faire des efforts supplémentaires sur les organes de stockage. Nous avons donc débuté de nouvelles études sur des batteries à plomb en 2002. Nous nous appuyons pour cela sur les compétences du CIRIMAT avec qui nous développons des modèles d'accumulateurs dédiés aux énergies renouvelables. Ces travaux sont synthétisés dans le chapitre 3.

La maturité des études sur le photovoltaïque montre quant à elle de nouveaux débouchés, notamment sur les systèmes embarqués et les microsystèmes de très faibles puissances. Nous avons donc développé un nouvel axe de recherche depuis 2000 au sein du LAAS-CNRS sur les micro-sources et micro-convertisseurs intégrés dédiés aux microsystèmes. Ces études ont tout d'abord fait l'objet de collaborations internes avec l'équipe MIS puis les équipes NANO et CIP. Avec le LGET et le LGEP, nous poursuivons de nouveaux travaux sur les cellules de troisième génération comprenant leur propre système de conversion intégré à travers des actions spécifiques labellisées par le CNRS. EDF enfin devient un partenaire industriel fort à travers des contrats de recherche et de valorisation

depuis 2001, pour effectuer des transferts qui aujourd'hui se concrétisent par un co-encadrement d'une thèse CIFRE débutant en 2003.

Aujourd'hui, les études menées sur l'optimisation de convertisseurs statiques d'énergie peuvent se généraliser à un certain nombre d'applications vis à vis de leur alimentation. Les objectifs sont de minimiser la taille et le volume tout en limitant les coûts de développement des nouveaux produits et en réduisant notamment les phases de prototypage réel. En effet, quel que soit le type d'application visée (*militaire, spatial, télécommunications, etc...*), les nouvelles alimentations doivent être compactes, semi-intégrées ou bien, dans un futur proche, totalement intégrées. Pour cela, elles doivent être modélisables avec une grande précision, en vue d'optimiser, dès leur conception, les contraintes de coût, de montée en fréquence et de puissance massique. En résumé, le but, dans les années futures, est d'atteindre de forts rendements de conversion sur les nouvelles alimentations devant avoir des tailles compatibles avec leurs applications. Pour répondre à cette demande, la solution a priori à adopter consiste à réaliser des « *system-on-chip* ». Ainsi, toutes les fonctions actives doivent être intégrées sur un même substrat. Mais, de nombreux problèmes de recherche subsistent à long terme, comme l'optimisation des éléments actifs intégrés, l'intégration des composants passifs, l'augmentation des fréquences de travail, la CEM et, de façon générale, la connaissance des interactions des différentes fonctions constituant une alimentation. Cette étude n'a été abordée que récemment (*début 2001*) par l'intermédiaire de collaborations avec l'équipe MIS du LAAS-CNRS et l'Université Rovira i Virgili (*URV*) de Tarragone, portant sur la réalisation d'alimentations électriques de faible puissance. Après avoir fait un bilan bibliographique des solutions technologiques en cours de développement pour créer des sources et des alimentations compactes voir intégrées, les travaux du LAAS-CNRS se sont d'abord focalisés sur la création d'éléments inductifs pour très faibles puissances, destinés en premier lieu à des applications comme les micro-systèmes et la conversion d'énergie décentralisée. Il faut souligner que ces travaux sont complémentaires à ceux développés dans l'équipe CIP et viennent renforcer l'effort du laboratoire sur l'intégration de puissance.

Les travaux que nous avons entrepris ont tout d'abord consisté à valider les outils de simulation permettant de concevoir de nouveaux composants passifs, en réduisant le nombre de réalisations technologiques. L'exemple de structure choisie pour illustrer la comparaison des résultats obtenus par les différentes méthodes est une structure d'inductance intégrée dédiée à la RF, pas forcément adaptée à la puissance. C'est en effet ce type de structure qui présentait le plus de résultats expérimentaux disponibles dans la littérature, pouvant nous servir de base de comparaison. Une fois les outils validés, les premiers jeux de dimensions géométriques permettant de répondre à un cahier des charges de micro-puissance ont donné des dimensions sub-microniques. Ainsi, nous avons fait appel aux nanotechnologies, développées en interne du LAAS-CNRS. Ils ont fait l'objet de divers encadrements de DEA et de thèse. Les travaux se poursuivent actuellement à travers le post-doctorat de M. Bruno Estibals ainsi que des thèses de M. Thomas Ricart et M. Alain Salles. Ils sont de plus appuyés par la présence depuis Septembre 2003 du Professeur Luis Martinez-Salamero, en poste rouge CNRS pour un an au LAAS-CNRS dans l'équipe TMN.

Chapitre 1

Problématique des travaux.

I.1. Les énergies renouvelables aujourd'hui.

En France, la production d'énergie électrique est faite principalement à base d'énergies fossiles et de combustible d'origine nucléaire. Un recours systématique aux carburants fossiles, tels que le pétrole, le charbon ou le gaz naturel, permet d'avoir de faibles coûts de production mais conduit à un dégagement massif de gaz polluant et de gaz à effet de serre. Selon [I-1], la production électrique à partir de combustibles fossiles est à l'origine de 40% des émissions mondiales de CO₂. L'énergie d'origine nucléaire, qui ne rejette pas directement de gaz carbonique, souffre généralement d'une mauvaise image médiatique à cause des risques importants encourus. Certes, les risques d'accident liés à leur exploitation sont très faibles mais les conséquences d'un accident seraient désastreuses. Par ailleurs, le traitement des déchets issus de ce mode de production est très coûteux : la radioactivité des produits traités reste élevée durant de nombreuses années. Enfin, les réserves d'uranium sont comme celles du pétrole, limitées (*moins de 100 ans au rythme actuel de consommation*).

Bien que notre pays soit excédentaire en production électrique aujourd'hui, l'avenir n'est donc pas prometteur sur les ressources en énergies fossiles, dont les réserves ne cessent de diminuer et dont les prix fluctuent énormément en fonction de la conjoncture. La préparation de l'avenir dans les domaines de production énergétique doit se prévoir dès aujourd'hui, pour pouvoir faire face progressivement aux changements énergétiques inévitables. Chaque innovation et chaque avancée en matière de recherche n'aura de retombées que dans une dizaine d'année au mieux, le temps d'effectuer les tests nécessaires et d'envisager la mise en production sans risque pour l'utilisateur autant pour sa propre santé que pour ses installations électriques.

A travers de grands programmes, l'Europe encourage des recherches sur des sources d'énergie jusque là considérées secondaires et à faible production. Les énergies renouvelables offrent aujourd'hui quelques pistes potentielles qui pourraient répondre aux nouvelles normes en terme de pollution sans présenter a terme des coûts de production trop élevés. Cependant, il reste encore pas mal de problèmes à résoudre pour que ces sources arrivent progressivement à prendre des parts importantes en terme de production. Le plus important d'entre eux est que, souvent, ces sources sont très fluctuantes et aléatoires. Il faut donc, dès le départ, tenir compte de cet aspect et prévoir leur insertion dans les réseaux électriques existants.

Un autre aspect vient du faible taux de concentration de ces sources en faisant naturellement des sources de plus faible puissance que celles assurant actuellement la production. Une décentralisation de la production s'impose donc. Ceci pose donc un nouveau problème de gestion qui remet en question le modèle de production centralisé et fait la promotion de petits systèmes autonomes.

Pour devancer les phénomènes de production par des sources délocalisées, la déréglementation européenne dans le domaine de la production et du transport d'électricité encourage dès à présent l'autonomie énergétique et favorise le développement des énergies propres et illimitées, en particulier à l'aide de générateurs éoliens et photovoltaïques. Il reste à résoudre la multiplication de sources de types différents, de tailles différentes, souvent délocalisées et à production aléatoire sur un réseau ne tolérant que 5% de variation de tension, sans être obligé d'avoir recours systématiquement à des batteries pour assurer un stockage temporaire de l'énergie.

La conversion photovoltaïque de l'énergie solaire est une des alternatives qui, depuis l'avènement des grands programmes spatiaux, a montré sa grande souplesse et son aptitude à fonctionner en milieu hostile. Il s'agit d'une solution intéressante aux moyens de productions conventionnels. Cependant, l'énergie délivrée par ces générateurs est directement dépendante des conditions atmosphériques et est relativement coûteuse, en raison du prix toujours élevé de ces générateurs. Ses principaux atouts restent sa grande autonomie de fonctionnement possible, une durée de vie des générateurs garantie supérieure à vingt ans et une absence de pollution lors de la production d'énergie. Son développement, bien qu'encore anecdotique en France, est en plein essor dans les pays nordiques notamment, et mérite une attention particulière, notamment pour créer des générateurs décentralisés.

Après l'hydraulique, le grand éolien devient compétitif en terme de coûts de production. Il participe dès à présent à la réduction des rejets de gaz à effet de serre. L'extension actuelle du parc éolien pose déjà le problème des concentrations importantes d'éoliennes, qui deviennent alors des sources perturbatrices pour le réseau électrique local en terme de fluctuation de production. En effet, cette énergie, comme l'énergie photovoltaïque, est soumise aux conditions météorologiques. Elle présente donc une fluctuation de production qui peut être importante en fonction du site d'installation, ce qui pose des problèmes sur les réseaux locaux qu'elles participent à alimenter. L'avenir semble ouvert aux très gros systèmes offshore, qui sont assimilables à des systèmes centralisés actuels, produisant de fortes quantités d'énergies électriques quasi-régulées car la vitesse du vent est souvent prédictible dans ces conditions de fonctionnement.

Aujourd'hui, il est difficile de prévoir quelles sont les solutions à adopter en terme de sources énergétiques. L'addition des sources d'énergie renouvelables aux précédentes à des taux ne dépassant pas les 30% au total constitue un bon compromis à l'heure actuelle : elle ne représente en effet quasiment pas de changement en terme de gestion et de transports de l'électricité par rapport aux solutions actuelles. Au contraire, ces nouveaux sites de production peuvent, moyennant de bons moyens de stockage, pallier les défaillances du réseau en cas de rupture de production et jouer des fonctions de secours.

A plus long terme, à l'échelle de l'habitat individuel, de collectivités locales ou d'entreprises, la création de petites unités de production autonomes est posée. En effet, cette solution semblerait répondre mieux aux nouvelles normes environnementales et aux problèmes de sécurité d'approvisionnement. Cependant, pour se développer à grandes échelles, des choix stratégiques doivent être faits pour continuer à baisser les coûts de production et augmenter les rendements de production.

1.2. L'énergie photovoltaïque.

1.2.1. Généralités.

Depuis très longtemps, l'homme a cherché à utiliser l'énergie émise par le soleil, étoile la plus proche de la terre. La plupart des utilisations sont directes comme en agriculture, à travers la photosynthèse, ou dans les diverses applications de séchage et chauffage, autant artisanale qu'industrielle. Cette énergie est disponible en abondance sur toute la surface terrestre et, malgré une atténuation importante lors de la traversée de l'atmosphère, la quantité restante demeure encore importante quand elle arrive au sol. On peut ainsi compter sur 1000 W/m² crête dans les zones tempérées et jusqu'à 1400 W/m², lorsque l'atmosphère est faiblement polluée en poussière ou en eau [I-2]. Le flux solaire reçu au niveau du sol dépend de :

- l'orientation, la nature et l'inclinaison de la surface terrestre,
- la latitude du lieu de collecte, de son degré de pollution ainsi que de son altitude,
- la période de l'année,
- l'instant considéré dans la journée,
- la nature des couches nuageuses.

Ainsi, il existe des zones dans le monde plus favorisées que d'autres du point de vue ensoleillement. Elles sont répertoriées sous forme d'atlas et mettent en évidence des «gisements solaires» [I-3]. Les principaux phénomènes physiques évoqués ci-dessus sont des paramètres à prendre en compte pour l'installation et la maintenance de générateurs photovoltaïques. En effet, le comportement de ces générateurs d'énergie s'avère plus ou moins aléatoire, en fonction du site de mise en fonctionnement. Ainsi, si l'on considère des zones à climat sec et possédant un taux d'ensoleillement important dans l'année, le flux solaire peut être facilement modélisable et prévisible en fonction des heures de la journée et des jours de l'année. Le fonctionnement des générateurs PV est alors souvent proche de celui estimé. Si, au contraire, on considère des zones plus défavorables, souvent ventées et présentant un temps nuageux alternant avec des périodes d'ensoleillement sur plusieurs journées par an, l'irradiation change rapidement et dans de larges proportions. Il est alors difficile de faire des prédictions fines sur le taux d'irradiation sur un lieu et une heure précise. Des relevés expérimentaux ont montré des changements d'ensoleillements importants inférieurs à 50ms, pouvant se produire plusieurs fois par minute. Dans ce cas très défavorable, l'exploitation du gisement solaire devient plus difficile par des générateurs PV, qui doivent tenir compte de cette réalité.

De même, prenons le cas d'un site présentant des zones d'ombres liées à des infrastructures ou des reliefs naturels. Le comportement du générateur PV ne va plus être homogène et va souvent présenter des comportements dégradés qu'il faudra soit éviter, soit prévenir. La production d'énergie est dans ce cas souvent bien dégradée. Enfin, il ne faudra pas négliger des changements brutaux de point de fonctionnement directement liés au comportement de la charge sur laquelle le générateur PV doit débiter. Ce dernier point peut en effet entraîner un fonctionnement du générateur PV bien en deçà de son point nominal si la charge est mal adaptée.

Ces premiers constats montrent que l'exploitation d'une énergie comme le photovoltaïque peut s'avérer complexe et inefficace sans une bonne connaissance des conditions d'exploitations. Pour faciliter une meilleure compréhension du comportement des générateurs PV, nous avons fait une synthèse en fonction de différentes contraintes.

1.2.2. L'effet photovoltaïque.

Pour la compréhension des travaux que nous avons menés dans cet axe, nous rappelons brièvement les différents phénomènes physiques mis en jeu dans la conversion photovoltaïque ainsi que les principales relations les caractérisant.

1.2.2.1. Brefs rappels sur l'énergie solaire.

Le rayonnement solaire est constitué de photons transportant chacun une énergie E_{ph} , qui répond elle-même à la relation suivante :

$$E_{ph} = h \frac{c}{\lambda} \quad (1.1)$$

Dans laquelle λ représente la longueur d'onde, h la constante de Planck et c la vitesse de la lumière. D'après (1.1), l'énergie transportée par un photon est inversement proportionnelle à sa longueur d'onde. Le flux d'énergie solaire est transmis sous forme de rayonnements électromagnétiques, dont l'ensemble des longueurs d'ondes est assez proche de celui émis par les corps noirs présents dans l'espace. Il est à remarquer que le spectre de l'énergie solaire en atmosphère terrestre est décalé vers le rouge et l'infrarouge par rapport au spectre hors atmosphère [I-4].

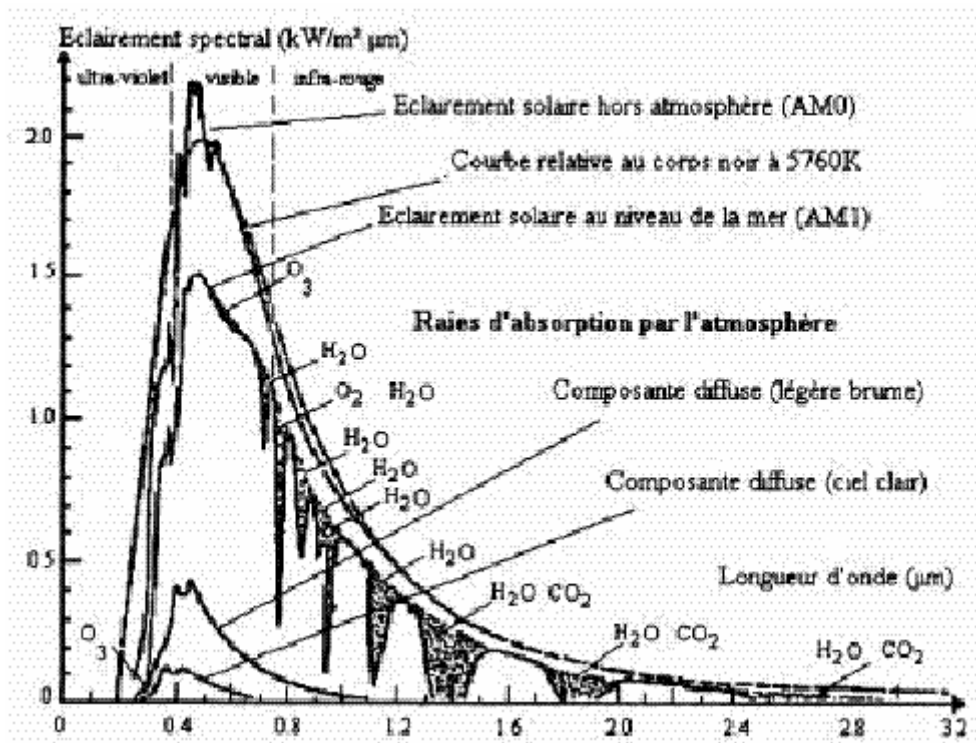


Figure 1.1. Exemples de spectre solaire [I-4].

AM0 : conditions d'éclairement hors atmosphère ou en haute altitude - AM2 : conditions d'atmosphère terrestre, le soleil étant à 30° sur l'horizon.

Les longueurs d'ondes du rayonnement solaire terrestre sont comprises entre 0,2µm (*ultra-violet*) et 4µm (*infra-rouge*) avec un maximum d'énergie pour 0,5µm. 97,5% de l'énergie solaire est comprise entre 0,2µm et 2,5µm. De 0,4µm à 0,78µm, le spectre correspond au domaine du visible. Les capteurs d'énergie solaire doivent donc être compatibles avec ces longueurs d'ondes pour pouvoir piéger les photons et les

restituer sous forme de chaleur ou d'électrons. Le tableau 1.1 donne les valeurs énergétiques caractéristiques des photons pour diverses longueurs d'ondes, ainsi que les zones correspondantes au spectre lumineux.

λ (μm)	E_{ph} (eV)	Zone
0,2	6,2	Ultra-violet
0,4	3,1	Visible bleu
0,5	2,48	Visible jaune-vert
0,78	1,59	Visible rouge
1	1,24	Infrarouge
2	0,62	Infrarouge
4	0,31	Infrarouge

Tableau 1.1 Valeurs énergétiques des photons issus du spectre solaire [I-4].

Pour que le rayonnement solaire produise un courant électrique dans un matériau donné, faisant alors office de capteur, il faut que les photons soient tout d'abord absorbés par un ou plusieurs matériaux sensibles à la longueur d'onde des photons. Puis, l'énergie des photons excite des électrons, qui sont ensuite collectés afin de constituer un courant électrique global.

I.2.2.2. Historique et synthèse des cellules photovoltaïques (PV).

Plusieurs types de matériaux sont susceptibles d'être utilisés dans les capteurs PV, soit seuls, soit associés sous forme de multicouches afin de mieux couvrir la totalité du spectre solaire. C'est en 1930 que les premières cellules PV à oxyde cuivreux (CuO) ont été créées, suivies de cellules en sélénium (Se). Pendant des années, l'effet photovoltaïque n'était en somme qu'une curiosité de laboratoire. En 1954, les premières cellules au silicium (Si) ont été réalisées dans les laboratoires de la compagnie Bell Telephone aux États-Unis. Depuis, les cellules PV ont commencé à faire l'objet de recherches plus intenses et se sont développées à l'échelle industrielle. Deux principales raisons en sont à l'origine. Tout d'abord, le faible coût de fabrication de ce matériau qui pouvait en plus être issu en abondance des déchets de la microélectronique. En effet, le recyclage possible permettait alors d'éviter les premières étapes technologiques relativement chères, notamment les étapes de purification. Une deuxième raison est le début du lancement d'importants programmes spatiaux et la nécessité d'avoir des sources d'énergie embarquées performantes.

Pour les applications spatiales, répondant à des normes de poids et de durées de vie sévères, les cellules PV sont rapidement devenues des cellules multicouches basées sur divers matériaux inorganiques, dont une des couches est souvent en AsGa. Elles présentent des rendements très élevés, une bonne fiabilité et une faible détérioration de leur caractéristique au cours du temps (*sur au moins 20 ans*). Les plus récentes sont formées de quatre couches de matériaux différents. Certaines recherches tendent même vers cinq couches. Bien que leurs performances soient meilleures que celles en Si, ces dernières ne se développent pas pour des applications terrestres en raison de leur prix, 50 à 100 fois plus chères. Pour les applications terrestres, le silicium est devenu le matériau largement le plus utilisé pour fabriquer des cellules PV en raison de son coût qui reste faible. Il est utilisé pour cela sous de nombreuses formes (*crystallin, multi-cristallin, amorphe, en couche mince,...*), en fonction des performances recherchées.

De par le monde, un certain nombre de recherches sont encore effectuées pour créer de nouvelles cellules de rendement plus élevé, possédant une forte stabilité de leurs caractéristiques dans le temps et présentant de faibles coûts de fabrication. Si ce type d'énergie doit être développé à très grande échelle

comme «Générateur électrique», il faut résoudre le problème du prix des capteurs. Aussi, depuis plusieurs années, on parle de matériaux organiques et de polymères qui présentent, sous certaines conditions, des propriétés photovoltaïques. Ceci suscite actuellement un regain de recherches dans divers laboratoires français renouvelant d'autant les efforts portés sur la synthèse des matériaux [I-5]. Ces cellules, dites de troisième génération, bien qu'actuellement présentant de faibles rendements par rapport aux capteurs inorganiques (*record mondial de 3,5% établi en 2001 [I-6, I-7]*), sont intéressantes par leur très faible coût et sont donc prometteuses pour l'avenir.

I.2.3. La jonction PN utilisée comme capteur PV.

I.2.3.1 Comportement.

En polarisant électriquement une jonction PN et en la soumettant à un éclairage solaire, on obtient les caractéristiques semblables à celles représentées en figure 1.2.

Sans éclairage, le comportement d'une cellule PV est semblable à celui d'une mauvaise diode. Ainsi, sous polarisation directe, la barrière de potentiel est abaissée et le courant de porteurs peut se développer. Sous polarisation inverse, seul un courant de porteurs minoritaires (courant de saturation) circule. Ce dernier varie peu avec la tension appliquée tant que cette tension est inférieure à la tension de claquage. Ces courants, directs ou inverses, comme pour des jonctions classiques, sont sensibles à la température de jonction.

Si cette jonction PN est soumise au rayonnement solaire, alors des paires électrons-trous supplémentaires sont créées dans le matériau en fonction du flux lumineux. Ce phénomène, aussi appelé effet photovoltaïque, ne se produit que si l'énergie des photons est supérieure ou égale à l'énergie de la bande interdite du matériau E_g . La différence de potentiel qui en résulte aux bornes de la structure caractérise l'effet photovoltaïque et se situe, selon les matériaux et la structure de la jonction, entre 0,3 et 0,7 V.

On notera que d'autres formes de capteurs peuvent être utilisés pour la conversion PV, notamment les jonctions Schottky et les cellules multicouches [I-8].

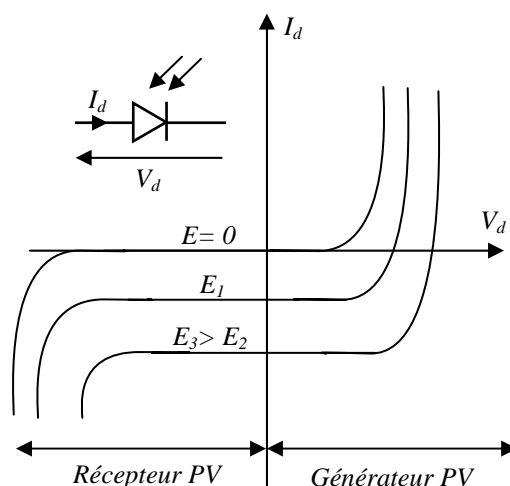


Figure 1.2. Caractéristiques d'une jonction PN polarisée sous différents éclairements (E).

I.2.3.2. Modélisation

Lorsque la jonction est éclairée, elle présente la particularité de pouvoir fonctionner en générateur, en produisant un courant de court-circuit proportionnel à l'éclairement. Ce comportement en statique peut être décrit par l'équation électrique suivante :

$$I_{PV} = I_{CC} - I_{Sat} \left[\exp\left(\frac{V_{PV} + (I_{PV} \times R_{ser})}{nV_T}\right) - 1 \right] - \frac{V_{PV} + (I_{PV} \times R_{ser})}{R_{shu}} \quad (1.2)$$

Avec $V_T = \frac{K.T}{e}$ représentant le potentiel thermodynamique, I_{Sat} le courant de saturation, K la constante de Boltzman ($1,381 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$), T la température effective des cellules (*en Kelvin*), e la charge de l'électron, n le facteur de non idéalité de la jonction, I_{PV} le courant fourni par la cellule lorsqu'elle fonctionne en générateur, V_{PV} la tension aux bornes de cette même cellule, I_{CC} le photocourant de la cellule dépendant de l'éclairement et de la température (*ou bien courant de court circuit*), R_{shu} la résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction, R_{ser} la résistance série représentant les diverses résistances de contacts et de connexions. Le modèle électrique correspondant à l'équation (1.2) est décrit ci-dessous.

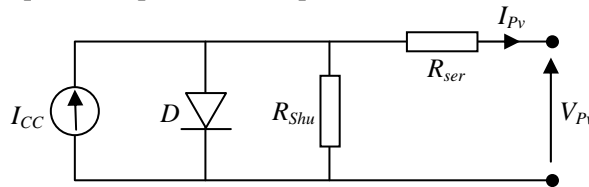


Figure 1.3. Schéma équivalent électrique de la cellule PV réelle.

Ce modèle a l'avantage d'être simple et implantable sur bon nombre de simulateurs « Système ». Il permet d'obtenir le comportement statique d'une cellule PV sous polarisation. Les principales limites en sont :

- *le comportement dynamique de la jonction*, lié à la durée de vie des porteurs, laquelle est fortement dégradée dans le cas de cellules PV [I-8, I-9], n'est pas pris en compte.
- *le comportement en température de la cellule*, qui ne tient pas compte de l'échauffement lié aux diverses pertes.

Toutefois, pour l'étude du comportement d'un générateur PV en conditions réelles de fonctionnement, ce modèle permet de reproduire les principaux comportements interagissant avec le reste du système.

I.2.4. Le générateur photovoltaïque (PV).

I.2.4.1. Constitution.

En associant les cellules PV en série (*somme des tensions de chaque cellule*) ou en parallèle (*somme des intensités de chaque cellule*), on peut constituer un générateur PV selon les besoins des applications visées. Les deux types de regroupement sont en effet possibles et souvent utilisés afin d'obtenir en sortie des valeurs de tension et intensité souhaités. Ainsi, pour N_s cellules en série, constituant des branches elles-mêmes (N_p) en parallèle, la puissance disponible en sortie du générateur PV est donnée par :

$$P_{PV} = N_s \cdot V_{PV} \cdot N_p \cdot I_{PV} \quad (1.3)$$

Si l'on désire avoir un générateur PV ayant un courant de sortie plus intense, on peut soit faire appel à des cellules PV de plus grande surface et de meilleur rendement, soit associer en parallèle plusieurs modules PV de caractéristiques similaires. Pour qu'un générateur PV ainsi constitué puisse fonctionner de façon

optimale, il faut que les (N_s , N_p) cellules se comportent toutes de façon identique. Elles doivent pour cela être issues de la même technologie, du même lot de fabrication et qu'elles soient soumises aux mêmes conditions de fonctionnement (*éclairage, température, vieillissement et inclinaison*).

La puissance du générateur PV sera optimale si chaque cellule fonctionne à sa puissance maximale notée P_{max} . Cette puissance est le maximum d'une caractéristique $P(V)$ du générateur, et correspond au produit d'une tension optimale notée V_{opt} et d'un courant optimal noté I_{opt} .

Pour réduire les dysfonctionnements, les fabricants ont choisi de ne pas commercialiser des cellules PV seules. Ainsi, les générateurs PV se trouvent souvent sous forme de modules pré-câblés, constitués de plusieurs cellules, aussi appelés par abus de langage panneaux PV. Chaque référence de module a ses propres caractéristiques électriques garanties à $\pm 10\%$ selon le lot de fabrication.

1.2.4.2. Propriétés.

Les caractéristiques électriques d'un panneau photovoltaïque varient en fonction de la température, de l'éclairage et, de façon générale, des conditions de fonctionnement lorsqu'il est connecté à une charge donnée. Nous rappelons brièvement dans ce paragraphe le comportement du générateur soumis à diverses contraintes. Ces notions sont en effet nécessaires pour comprendre le comportement d'un générateur PV et ensuite effectuer des optimisations de fonctionnement.

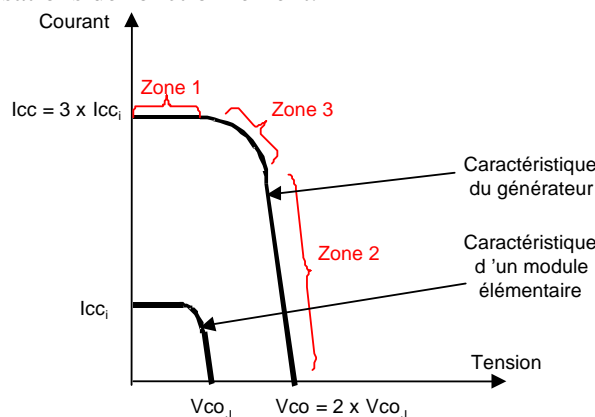


Figure 1.4. Caractéristiques $I(V)$ d'une cellule et d'une association de 3 branches en parallèle ayant chacune 2 cellules en série.

Selon l'association en série et/ou parallèle de ces cellules, les valeurs du courant de court-circuit I_{CC} et de la tension à vide V_{CO} sont plus ou moins importantes (*figure 1.4*). La caractéristique d'un générateur PV constitué de plusieurs cellules a une allure générale assimilable à celle d'une cellule élémentaire, sous réserve qu'il n'y ait pas de déséquilibre entre les caractéristiques de chaque cellule (*irradiation et température uniformes*). Nous pouvons décomposer la caractéristique $I(V)$ d'un générateur photovoltaïque en 3 zones :

- Une zone assimilable à un générateur de courant I_{CC} proportionnel à l'irradiation, d'admittance interne pouvant être modélisée par $\frac{1}{R_{SH}}$ (*Zone 1*),
- Une zone assimilable à un générateur de tension V_{CO} d'impédance interne équivalente à R_S (*Zone 2*),
- Une zone où l'impédance interne du générateur varie très fortement de R_S à R_{SH} (*Zone 3*).

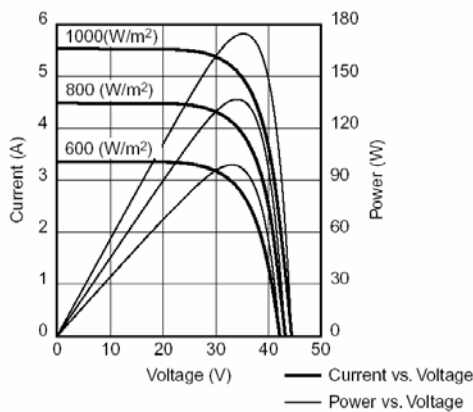
C'est dans la Zone 3 qu'est situé le point de fonctionnement pour lequel la puissance fournie par le générateur est maximale. Ce point est appelé point de puissance optimale, caractérisé par le couple (I_{OPT} ,

V_{OPT}), et seule une charge dont la caractéristique passe par ce point, permet d'extraire la puissance maximale disponible dans les conditions considérées.

1.2.4.3. Comportement en température et sous divers éclairagements homogènes.

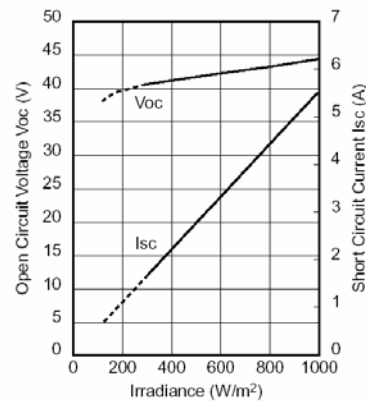
Les influences de l'éclairage et de la température sur la puissance pouvant être délivrée par un panneau PV sont importantes. Les variations du courant et de la puissance en fonction de la tension pour différents niveaux d'éclairagements à température maintenue constante (figure 1.5a) montrent clairement l'existence de maxima sur les courbes de puissance correspondant aux Points de Puissance Maximale P_{max} (V_{OPT} , I_{OPT}). Lorsque l'irradiation varie pour une température donnée, le courant de court-circuit I_{sc} ou I_{cc} varie proportionnellement à l'irradiation. Dans un même temps, la tension de circuit ouvert V_{oc} (à vide) varie très peu (figure 1.5b). Par contre, si la température croît à irradiation constante, la tension V_{oc} décroît alors que le courant I_{sc} croît légèrement (figure 1.5c). De ces données, on peut estimer qu'en fonction des conditions de fonctionnement auxquelles on va soumettre le panneau, on peut en déduire la puissance qu'il va pouvoir délivrer. Il faut cependant prendre quelques précautions quant à l'utilisation de ces données pour estimer la quantité d'énergie délivrée par un générateur.

Current, Power vs. Voltage Characteristics (Cell temperature: 25°C)



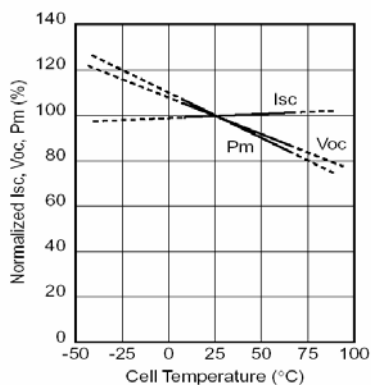
a.

Open Circuit Voltage, Short Circuit Current vs. Irradiance Characteristics (Cell temperature: 25°C)



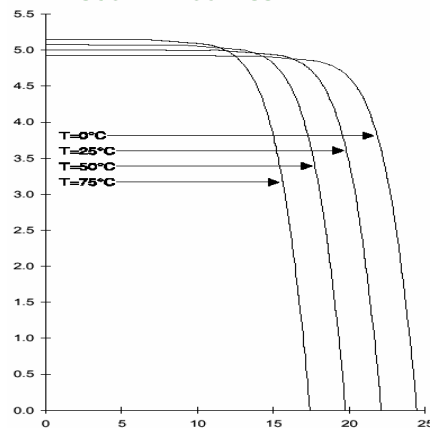
b.

Normalized Isc, Voc, Pm vs. Cell Temperature Characteristics



c.

BP 585F I-V Curves



d.

Figure 1.5. Extrait de caractéristiques techniques du panneau NT-R5E3H (a),(b),(c), du panneau photovoltaïque BP585F de chez BP SOLAR (d) [I-4].

On notera que les fabricants ne peuvent garantir ces données qu'à 10% près, compte tenu de la dispersion des caractéristiques de chaque cellule. La dispersion de ces données augmente lorsque le panneau est placé dans les conditions réelles de fonctionnement. En effet, d'autres paramètres interviennent alors comme le vieillissement des cellules, les interconnexions avec les autres panneaux et la charge, l'incidence du rayonnement solaire, la qualité de l'irradiation et l'inhomogénéité des températures internes des cellules PV encapsulées. Les données « constructeur » ne restent donc qu'une estimation de la puissance pouvant être délivrée.

Ainsi, même si, à chaque instant, le taux d'irradiation et la température arrière du panneau sont connus, la puissance instantanée réellement délivrée n'est pas forcément celle indiquée dans les caractéristiques techniques. Diverses constantes de temps thermiques et électriques interviennent. Sans mesures directes, la connaissance du point de puissance maximal à un instant donné s'avère alors difficile à obtenir. Beaucoup de travaux de recherche ont essayé de modéliser P_{max} et sont rapidement tombés sur ces difficultés. Les modèles mis en jeu sont très vite devenus très complexes. La précision de sa valeur n'est toutefois pas garantie pour autant. Cette première analyse montre les difficultés à maîtriser ce type de source d'énergie. En effet, sans une connaissance précise des puissances délivrables, toute loi de commande consistant à optimiser le fonctionnement d'un générateur PV sera inefficace.

1.2.4.4. Influence de l'éclairement inhomogène.

Dans certaines conditions, on ne peut pas garantir une irradiation homogène sur la totalité du générateur PV (*ombres partielles sur le générateur PV, liées par exemple à des feuilles d'arbre tombées à l'automne, ombres d'infrastructures de bâtiments*). Ainsi, lorsque une ou plusieurs cellules d'un générateur PV est éclairée différemment par rapport à ses proches voisines, un comportement dégradé apparaît pour le générateur PV [I-10, I-11]. Les cellules recevant moins d'énergie doivent dissiper le surplus de courant délivré par celles qui sont les plus éclairées, créant ainsi des échauffements locaux pouvant aller jusqu'à la destruction d'une partie du générateur PV si le défaut persiste. Des poussières sur l'ensemble des capteurs peuvent à la longue produire ce type de défaut. Ces phénomènes ont une incidence directe sur la production d'énergie. La puissance délivrée par le générateur peut alors fortement chuter par rapport à la puissance produite sous éclairage homogène. De simples simulations effectuées à l'aide du modèle de la figure 1.3 pour chaque cellule le montrent (figure 1.6).

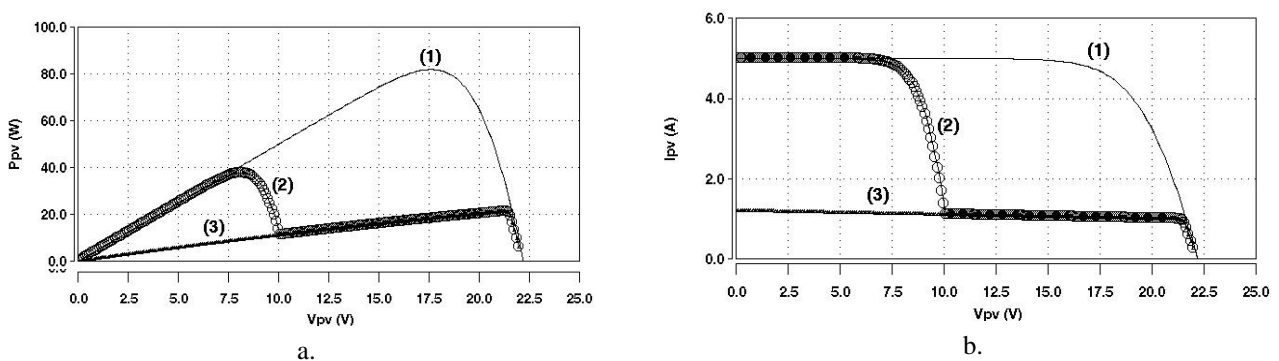


Figure 1.6 : Caractéristiques électriques d'un générateur PV de 36 cellules ayant deux diodes de protection (*dites diodes by pass*) pour différents éclairages inhomogènes.

Courbe (1) : Eclairage homogène sur l'ensemble du générateur (1000 W/m^2). **Courbe (2) :** Une cellule moins éclairée (200 W/m^2) que le reste du générateur (1000 W/m^2). **Courbe (3) :** Mêmes conditions de fonctionnement que la courbe 2 mais sans diodes de protection (*by-pass*).

En résumé, ce défaut doit être évité le plus possible sous peine de rapidement détériorer un générateur PV. Jusqu'à présent, pour éviter des détériorations définitives, des diodes de protection supplémentaires sont placées sur les générateurs PV de forte puissance (*diode by-pass*, *diode anti-retour*). Cependant, ces protections sont coûteuses, autant en surplus de composants qu'en perte de rendement.

1.3 Introduction des travaux menés dans ce domaine.

1.3.1. Utilisation d'un générateur PV.

L'utilisation directe de l'énergie sortant d'un générateur PV est possible. Par exemple, un panneau PV commercialisé peut être directement connecté à une charge de type batterie. Il faut cependant que la charge accepte la tension et le courant continus délivrés par le générateur. Une autre précaution doit être prise pour éviter de détériorer le générateur par un retour de courant sur ce dernier (*figure 1.7a*). Ainsi, fréquemment, une diode anti-retour est placée entre la source et la charge. Cependant, dans ce cas de connexion directe, le panneau n'est exploité au mieux qu'au point de fonctionnement pour lequel la tension nominale de la charge est égale à la tension optimale du générateur V_{OPT} . Comme l'illustre la figure 1.7c pour une charge de type batterie, si $E_{eq} < V_{OPT}$ ou $E_{eq} > V_{OPT}$, le panneau PV délivre une puissance inférieure à sa puissance maximale délivrable P_{max} .

Une connexion indirecte entre la charge et le générateur par l'intermédiaire d'un convertisseur statique est parfois nécessaire (*figure 1.7b*). Les raisons sont de plusieurs types :

- les formes des tensions et des courants délivrés par le générateur ne sont pas compatibles avec la charge (*cas d'une charge devant être alimentée en sinusoïdal*),
- la tension nécessaire à la charge est très élevée par rapport à celle délivrée par un panneau,
- la tension et/ou le courant de la charge doivent être contrôlés,
- la production de puissance du générateur PV doit être maximisée par l'intermédiaire d'une loi de commande de type MPPT.

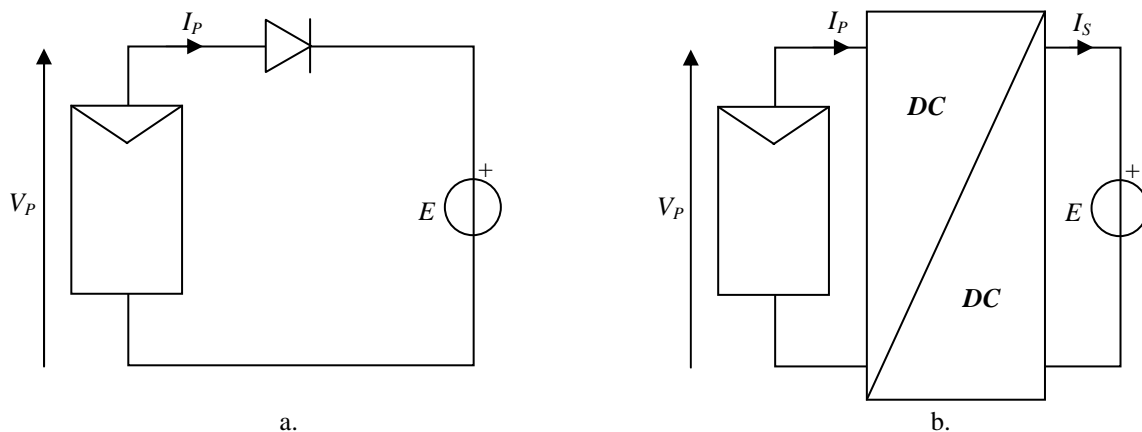


Figure 1.7. Connexions d'un générateur PV à une charge.
a. Connexion directe. B. Montage avec convertisseur statique jouant le rôle d'étage d'adaptation.

Diverses discussions sur l'utilité d'une connexion indirecte sont ouvertes dans la communauté scientifique. Souvent, un simple calcul de rendement de conversion ne suffit pas pour argumenter en faveur d'une solution ou une autre des deux solutions, connexion directe ou indirecte.

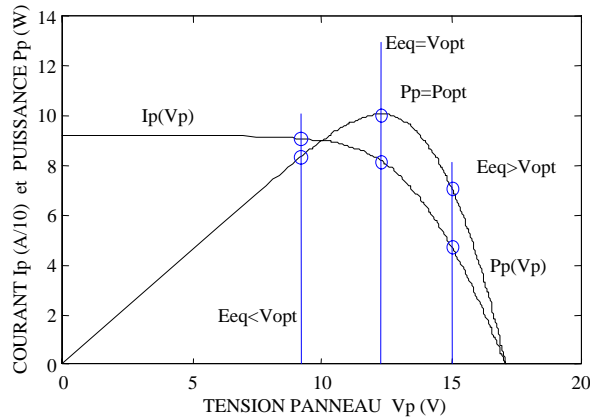


Figure 1.7. c. Différentes connexions d'un panneau PV et une batterie de tension E_{eq} .

Ainsi, lorsque la charge présente une tension nominale proche de la tension optimale V_{OPT} d'un générateur PV, l'apport du convertisseur statique du point de vue gain de production est discutable. En effet, une commande de type MPPT augmente la production du générateur. Mais le convertisseur statique présentant un rendement de conversion et un coût important peut rendre le système plus cher, sans apporter de production d'électricité supplémentaire. Le cas le plus flagrant concerne les systèmes à un ou deux panneaux PV alimentant une batterie. Dans ce cas, d'autres arguments sont à considérer pour faire le choix entre une connexion directe ou indirecte comme :

- la nécessité de réguler la charge d'une batterie en vue d'augmenter sa durée de vie,
- la présence de sécurités pour pallier certains dysfonctionnements,
- le contrôle de la production de puissance PV.

Pour d'autres charges devant être par exemple alimentées en sinusoïdal, le convertisseur statique jouant le rôle d'adaptateur entre la source et la charge est indispensable. Dans ce cas, la présence d'une MPPT apporte un gain important de production.

Nos travaux de recherche se situent essentiellement dans ce contexte depuis notre nomination en tant que Maître de Conférences à l'université Paul Sabatier en 1996. Nos premières contributions scientifiques ont porté sur l'amélioration du rendement de conversion de chaînes de PV pour les rendre d'un côté moins coûteuses et d'un autre côté plus robustes. Notre objectif était alors de permettre un développement plus important de ce type de source et en faire une énergie de grande production à part entière. Nos études se sont essentiellement déroulées au sein du LAAS-CNRS depuis 1996 et ont porté sur plusieurs points de la chaîne de conversion (*commande MPPT, architectures de conversion, choix de composants spécifiques*) et ont de plus contribué à développer de nouveaux axes spécifiques de recherche comme le couplage avec d'autres sources, le développement de nouveaux matériaux de stockage, l'intégration d'une partie de la chaîne de conversion. Ces études se sont focalisées sur les points clés permettant d'augmenter le rendement global des chaînes de conversion.

1.3.2. Notion de rendements.

Avant de détailler dans ce mémoire les axes de recherches que nous avons développés, il est indispensable de définir les différentes notions de rendement qui sont utilisées par la communauté scientifique et sur lesquels nous nous reposons pour effectuer des comparaisons entre différents générateurs et chaînes.

La notion de rendement doit être définie avant tout car elle est très vaste et peut amener certaines confusions dans l'interprétation de résultats expérimentaux. Prenons le cas d'une chaîne de conversion PV simple comme celle décrite figure 1.8, ne comprenant qu'un générateur PV, un interrupteur commandable ou un convertisseur statique et une charge. A ce niveau, on peut déjà parler de plusieurs rendements.

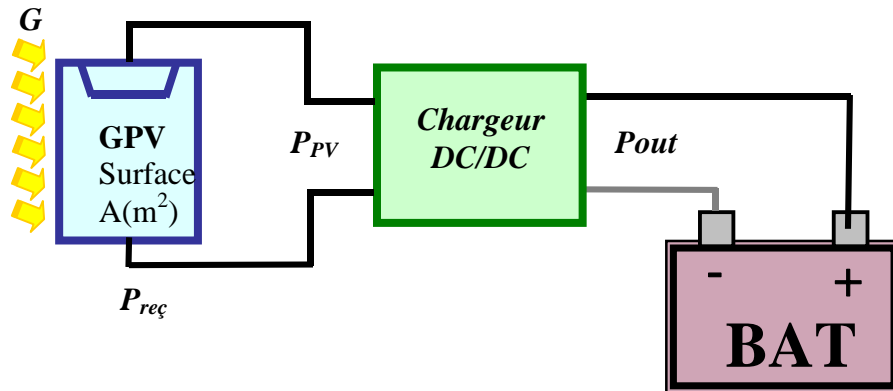


Figure 1.8 : Exemple de chaîne élémentaire de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, un chargeur de batterie et une batterie Plomb-Acide.

1.3.2.1. Rendement de conversion d'une cellule PV.

Lorsque l'on s'intéresse à l'énergie PV, le premier rendement à définir est celui concernant la conversion de l'énergie solaire en électricité par l'intermédiaire de cellules ou de générateurs PV. En effet, le rendement de conversion d'une cellule PV est un critère important pour ce type de capteur. Les mesures effectuées par les fabricants doivent répondre à des normes précises sur le type de spectre lumineux, la pression et la température de fonctionnement. Un certain nombre de rendements différents peuvent être définis comme ceux permettant de connaître la sensibilité d'une cellule à une longueur d'onde donnée. Ces rendements préliminaires servent à qualifier les cellules et les générateurs en laboratoire afin de pouvoir en mesurer précisément leurs performances. Pour l'exploitation des cellules en condition réelle et dans le but d'effectuer des comparaisons objectives des diverses performances de cellules PV existantes, nous ne nous sommes intéressés qu'au rendement global de conversion d'énergie des photons en électrons. Ce rendement correspond au rapport entre la puissance électrique effectivement délivrée par les cellules PV lorsqu'elles sont éclairées par un éclairement connu et normé sur la quantité d'énergie équivalente électrique reçue.

Prenons l'exemple d'un éclairement de type AM1,5 délivrant globalement $G = 1 \text{ kW/m}^2$ sous un spectre proche de celui reçu au niveau du sol sur Terre. G correspond à l'irradiance, autrement nommée puissance lumineuse reçue par unité de surface. On peut définir la puissance électrique équivalente P_{rec} reçue par un panneau de surface A :

$$P_{rec} = G \cdot A \quad (1.4)$$

Le rendement caractérisant le taux de conversion photons-électrons d'un panneau solaire photovoltaïque, noté η_{PV} , est alors défini selon l'équation (1.5)

$$\eta_{PV} = \frac{P_{PV}}{G \cdot A_{eff}} \quad (1.5)$$

où P_{PV} correspond à la puissance délivrée par le panneau PV et A_{eff} la surface effective du panneau PV représentant uniquement la partie active du capteur PV effectuant la conversion des photons en électrons. Cette dernière grandeur ne doit pas être confondue avec la surface totale du panneau comprenant

l'infrastructure et souvent notée A_T . Le rendement maximum de la conversion photons-électrons du panneau solaire noté η_{PV_max} est défini selon l'équation (1.6)

$$\eta_{PV_max} = \frac{P_{MAX}}{G \cdot A_{eff}} \quad (1.6)$$

Dans laquelle P_{MAX} est le maximum de puissance potentiellement disponible à la sortie du panneau PV. Plus précisément, les rendements η_{PV} et η_{PV_max} dépendent du matériau de conversion utilisé et des pertes liées à la technologie mise en œuvre pour réaliser une cellule. Parmi les matériaux les plus utilisés, on trouve le Silicium (Si) sous diverses formes cristallines (*monocristallin, polycristallin ou bien amorphe*). Les rendements η_{PV_max} les plus courants des modules PV actuellement commercialisés sont de l'ordre de :

- 12,7% pour le silicium amorphe hydrogéné,
- 15% pour le silicium multicristallin,
- 23% pour le silicium monocristallin.

De nombreux autres composés ont fait l'objet d'études, notamment les hétérojonctions à base de sulfures (CdS et Cu_2S) puis plus récemment à base d'Arséniure de Gallium ($GaAs$) pour lesquels des rendements prometteurs en laboratoire ont été obtenus, dépassent les 25%. De nouveaux composés comprenant au minimum trois matériaux différents, sous forme de couches superposées ont été réalisées en laboratoire et ont produit des rendements supérieurs à 30%. Le tableau 1.2 est un classement des meilleurs résultats publiés en laboratoire concernant le rendement défini en (1.6).

I.3.2.2. Rendement d'une chaîne de conversion de Puissance.

Pour d'une part, avoir une idée plus précise des origines des pertes et, d'autre part, pouvoir effectuer des comparaisons, des rendements intermédiaires de chaque partie de la chaîne de conversion de puissance doivent être définis comme il a été fait pour les cellules et générateurs PV.

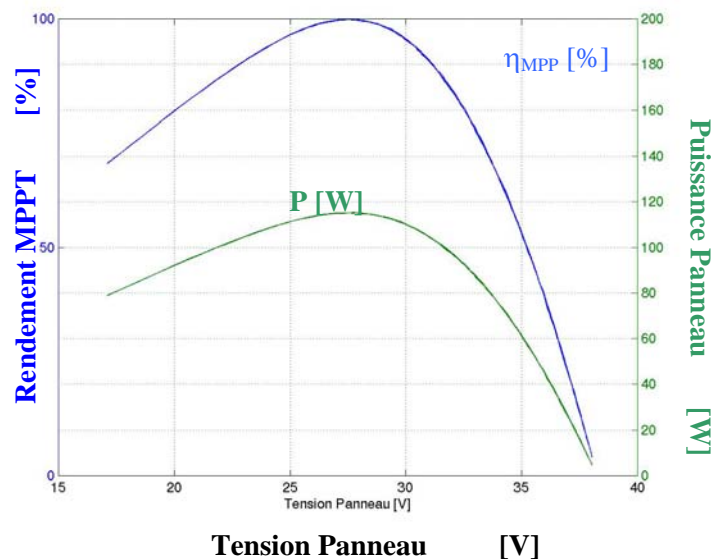


Figure 1.9 : Exemple de puissance disponible sur un panneau PV réel et évolution du rendement η_{RPF} pour différents points de fonctionnement, mesures réelles faites avec le banc de mesure du Site LAAS-CNRS.

(Suite page 20)

Classification	Rendement η_{PV_max} (%)	Surface (cm^2)	Courant de Court-Circuit I_{cc} (mA/cm^2)	Tension de circuit ouvert V_{oc} (V)	Centre de test (date du test)
Silicium (cellules)					
Si cristallin	$24,7 \pm 0,5$	4	42,2	0,706	Sandia (3/99)
Si multicristallin	$19,8 \pm 0,5$	1,09	38,1	0,654	Sandia (2/98)
Si film	$16,6 \pm 0,4$	4,017	32,8	0,645	FhG-ISE (7/01)
Si film (module)	$7,25 \pm 0,2$	478	0,525	21,36	Sandia (7/01)
III-V (cellules)					
GaAs cristallin	$25,1 \pm 0,8$	3,91	28,2	1,022	NERL (3/90)
GaAs film	$23,3 \pm 0,7$	4	27,6	1,011	NERL (4/90)
GaAs multicristallin	$18,2 \pm 0,5$	4,011	23,0	0,994	NERL (11/95)
InP cristallin	$21,9 \pm 0,7$	4,02	29,3	0,878	NERL (4/90)
Multicristallin film					
CIGS (cellule)	$18,4 \pm 0,5$	1,04	35,7	0,669	NERL (2/01)
CIGS (sous-module)	$16,6 \pm 0,4$	16,0	8,35	2,643	FhG-ISE (3/00)
CdTe (cellule)	$16,5 \pm 0,5$	1,132	26,7	0,845	NERL (9/01)
CdTe (sous-module)	$10,6 \pm 0,3$	63,8	2,26	6,565	NERL (2/95)
Si Amorphe					
Nanocristallin	$10,1 \pm 0,2$	1,199	24,4	0,539	JQA (12/97)
Photochemical					
Nanocristallin (cellule)	$6,5 \pm 0,3$	1,6	13,4	0,769	FhG-ISE (1/97)
Nanocristallin (sous-module)	$4,7 \pm 0,2$	141,4	11,3	0,795	FhG-ISE (2/98)
Multijonction Cellules					
GaInP/GaAs	$30,3 \pm 1,6$	4	14,22	2,488	JQA (4/96)
GaInP/GaAs/Ge	$28,7 \pm 1,4$	29,93	12,95	2,571	NERL (9/99)
GaAs/CIS (film)	$25,8 \pm 1,3$	4	-	-	NERL (11/89)
Si/CIGS (film)	$14,6 \pm 0,7$	2,4	-	-	NERL (6/88)
Module			(A)		
Si cristallin	$22,7 \pm 0,6$	778	3,93	5,6	Sandia (9/96)
Si multicristallin	$15,3 \pm 0,4$	1017	1,36	14,6	Sandia (10/94)
CIGSS	$12,1 \pm 0,6$	3651	2,83	23,42	NERL (3/99)
CdTe	$10,7 \pm 0,5$	4874	3,205	26,21	NERL (4/00)

Tableau 1.2. Rendements de cellules et générateurs PV mesurés à une température de 25 °C et un éclaircissement de 1000 W/m^2 sous un spectre global de AM 1,5 [I-10].

Nous définissons le rendement du convertisseur noté η_{CONV} , généralement fourni par les documents constructeurs par la relation (1.8), en notant P_{out} la puissance délivrée en sortie du convertisseur.

$$\eta_{CONV} = \frac{P_{OUT}}{P} \quad (1.7)$$

Le premier rendement que nous définissons en sortie du générateur PV est lié au point de fonctionnement réel du générateur PV et de son éloignement par rapport au point optimal. Nous le notons η_{RPF} ou η_{MPPT} . Il permet de mesurer l'efficacité de la commande permettant de forcer le point de fonctionnement du générateur PV au plus près du point optimal, et peut être aussi appelé rendement de la commande MPPT :

$$\eta_{RPF} = \frac{P_{PV}}{P_{MAX}} = \eta_{MPPT} \quad (1.8)$$

avec P_{MAX} dépendant des paramètres physiques du panneau et des conditions météorologiques [I-11] et P_{PV} la puissance effectivement délivrée par un générateur PV dépendant de la présence d'une commande utilisée dans le convertisseur (*MPPT, asservissement de tension, etc...*). Le rendement total de la chaîne de conversion η_{TOTAL} (1.9) est défini comme le produit des trois rendements précédemment définis.

$$\eta_{TOTAL} = \frac{P_{MAX}}{G \cdot A_{eff}} \cdot \frac{P_{PV}}{P_{MAX}} \cdot \frac{P_{OUT}}{P_{PV}} = \eta_{PV} \eta_{MPPT} \eta_{CONV} \quad (1.9)$$

Pour les études que nous avons développé jusqu'à aujourd'hui, seuls les rendements du point de fonctionnement et du convertisseur ont été considérés. Nous nommons rendement global d'un convertisseur statique doté d'une commande MPPT η_{GLOB} , le produit du rendement du convertisseur par le rendement du point de fonctionnement ou rendement de la commande :

$$\eta_{GLOB} = \frac{P_{PV}}{P_{MAX}} \cdot \frac{P_{OUT}}{P_{PV}} = \eta_{MPPT} \eta_{CONV} \quad (1.10)$$

1.4. Axes de recherches développés.

En accord avec les diverses politiques incitatives autant européennes, nationales et régionales, nos travaux s'inscrivent dans le domaine de l'amélioration de la production d'énergie électrique à partir de sources d'énergies renouvelables. Ils se sont tout d'abord focalisés sur l'acquisition d'une meilleure connaissance du comportement de sources d'énergie photovoltaïque. Ceci nous a permis de concevoir et réaliser de nouvelles solutions d'architectures de conversion et de contrôles.

Pour cela, nous avons tout d'abord conçu le concept de brique élémentaire qui correspond à une chaîne élémentaire de conversion de très haut rendement comprenant sa propre loi de commande. Cette brique relativement autonome peut soit fonctionner seule, soit s'associer à d'autres chaînes pour augmenter l'énergie produite. Les principales avancées que nous avons faites dans ce domaine sur les divers types de commande MPPT, la création de convertisseurs DC/DC de haut rendement et les associations série et parallèle de convertisseurs élémentaires sont consignés dans le chapitre 2. Pour valider le concept de brique élémentaire, un site de démonstration a été développé au sein même du LAAS-CNRS. Ses principales performances sont consignées au chapitre 3 de ce mémoire. Sans le couplage à d'autres sources d'énergies, le photovoltaïque est voué à rester une source onéreuse trop fluctuante. Nous présentons les travaux en cours de développement sur le couplage de l'énergie PV à d'autres sources d'énergies comme l'éolienne à travers des éléments de stockage dans le chapitre 3 ainsi que les perspectives actuellement en cours de validation sur le couplage éolien-photovoltaïque pour des générateurs autonomes et sur de nouvelles études sur le stockage énergétique. Nous avons poussé le concept de modularité des chaînes de conversion développé au chapitre 2 à l'extrême. Ceci nous a amené à concevoir la partie adaptation électrique au plus près du générateur PV et à

terme à l'intégrer au générateur. Nous avons pour cela développé un nouvel axe de recherches à part entière nommé micro-sources et micro-convertisseurs intégrés pour alimentation des microsystèmes. En effet, l'énergie PV étant naturellement discrétisable, sa chaîne de conversion devrait l'être aussi. Cette idée poussée à l'extrême aboutie à des convertisseurs statiques à l'échelle d'une cellule PV. Le chapitre 4 est le résumé des dernières avancées que nous avons faites dans ce domaine en particulier sur la réalisation d'éléments passifs de stockage.

1.5. Contexte de ces travaux dans les programmes de recherches.

Diverses études ont été menées au sein du LAAS-CNRS depuis 1996 afin d'essayer de résoudre les problèmes évoqués ci-dessus. Parallèlement, cette période coïncide avec un regain d'intérêt du point de vue national et européen pour les énergies renouvelables, avec une politique incitative de plus en plus intense à travers de grands programmes comme THERMIE et JOULE pour l'Europe et CNRS/ADEME Ecodev pour la France. Le LAAS-CNRS, ayant effectué beaucoup de travaux dans les années 70 sur l'énergie solaire, a été sollicité pour redémarrer des axes de recherches sur l'amélioration du traitement de l'énergie. L'objectif était de rendre plus fiable et moins coûteux ce traitement pour des productions à grande échelle. Comme beaucoup de laboratoires français avaient continué des efforts de recherche sur les matériaux et les cellules PV à travers des veilles technologiques, nous avons donc choisi de concentrer nos premiers efforts sur l'étude du système de conversion électrique. En effet, en 1997, aucun industriel français ne se risquait dans ce domaine et très peu de laboratoires de recherche avaient des ressources suffisantes pour se lancer dans des domaines déjà bien développés dans le nord de l'Europe (Allemagne, Suisse, Hollande).

L'obtention de contrats européens de démonstration devant permettre des installations d'envergure à Barcelone et sa banlieue proche a permis d'avoir les fonds suffisants pour effectuer des études prospectives qui, avant tout, avaient pour but de faire des états des lieux précis pour savoir ce qui était résolu et les verrous bloquants encore non élucidés. Très rapidement, les premiers constats effectués sur les onduleurs PV existants et déjà commercialisés ont montré qu'un certain nombre d'améliorations pourraient être faites afin d'augmenter le rendement et la fiabilité de ce type de systèmes de conversion [I-12]. Ainsi, pour améliorer le rendement d'un générateur PV de forte puissance à base de cellules silicium, devant injecter l'énergie produite sur un réseau électrique, les premières améliorations à apporter concernaient plus particulièrement deux points :

- **L'amélioration du refroidissement des cellules PV.** Le rendement de conversion photons-électrons croît ainsi rapidement au fur et à mesure que la température interne de fonctionnement des cellules PV diminue.
- **L'amélioration de la connectique entre les différents panneaux PV, onduleurs et éventuellement organes de stockage par des architectures appropriées.** Cette démarche devrait apporter un gain en production de 20 % supplémentaire. En effet, on peut encore aujourd'hui constater qu'il existe un décalage d'environ 20 % entre le rendement théorique calculé de l'installation et celui effectivement mesuré sur les systèmes de forte puissance existants. Ainsi, la puissance réelle de l'installation est bien en dessous de celle théoriquement transférable à la charge. Des pertes électriques sont constatées à plusieurs endroits du système de conversion et sont communément imputées à l'étage de conversion placé entre les panneaux et la charge.

De par notre expérience passée sur des systèmes de conversion électrique, nous avons choisi de nous focaliser sur l'optimisation du fonctionnement de l'étage de conversion électrique pour en améliorer le rendement de conversion. Le concept de «**brique élémentaire de conversion**» générique est né en 1997 [I-

13]. Il devait être de puissance suffisamment faible pour permettre de répondre à une large gamme de puissance par une association judicieuse de N briques. Ces travaux ont été la base de mes travaux développés au laboratoire ces dernières années. Cependant, comme ils nécessitaient des compétences pluridisciplinaires poussées, ils ont rapidement fait l'objet de collaborations fructueuses avec d'autres laboratoires et des partenaires industriels, notamment avec le département de recherche DEEEA de l'ETSE à Tarragone, du Professeur Luis Martinez Salamero.

Chapitre 2

Gestion et optimisation des systèmes photovoltaïques.

II.1. Position du problème.

II.1.1. Les chaînes de conversion photovoltaïque.

La synthèse des différents comportements d'un générateur photovoltaïque effectuée, au chapitre 1, montre que, dans la plupart des cas, cette source n'est pas correctement adaptée à une charge. Généralement, un étage d'adaptation comprenant un ou plusieurs convertisseurs statiques permet de transformer les grandeurs électriques continues en grandeurs adaptées à la charge. Cet étage peut être piloté par une ou plusieurs lois de commande afin de maximiser la puissance produite par le générateur, réguler la charge ou bien encore assurer différentes fonctions de protections. Pour que cet étage d'adaptation joue pleinement son rôle et soit transparent vis-à-vis du système, il faut qu'il présente de faibles pertes de conversion.

En électronique de puissance, le dimensionnement des éléments de chaque étage repose sur des règles strictes, tenant compte des contraintes maximales que chaque élément doit subir (*courant, tension, fréquences, température de fonctionnement, loi de commande utilisée, respect des normes de pollution CEM, packaging*).

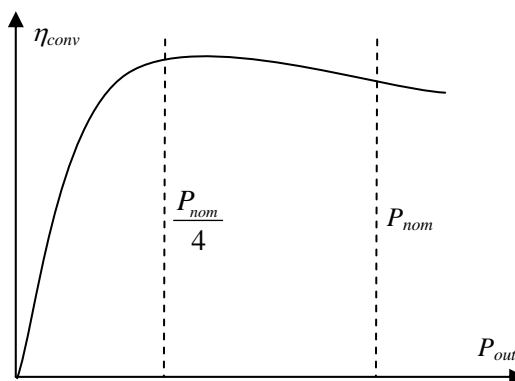


Figure 2.1. Exemple d'allure du rendement d'un convertisseur statique en fonction de sa puissance de sortie.

Le dimensionnement de l'étage de conversion est alors optimal si le rendement de conversion électrique maximum correspond à la plage nominale de fonctionnement, autrement dit à la plage de fonctionnement la plus utilisée. Ceci permet en effet de minimiser au maximum les pertes de conversion. Si l'on considère l'évolution du rendement η_{conv} d'un étage de conversion en fonction de la puissance transmise (*figure 2.1*), la zone d'utilisation optimale du convertisseur est comprise entre 20% et 100% de sa puissance nominale.

Pour le cas des sources d'énergie renouvelables, subissant de fortes variations de leur point de fonctionnement liées aux changements de conditions météorologiques, l'étage de conversion peut subir à ses

bornes d'entrée de larges variations de production de puissance allant d'une puissance nulle à une puissance maximale, sans qu'il soit possible de prévoir les instants de variations ni leurs amplitudes. Ceci pose dans ce cas, le problème du transfert de puissance aux faibles valeurs. En effet, pour une puissance de fonctionnement inférieure à 20% du point nominal, le rendement de conversion de l'étage d'adaptation baisse fortement. La chaîne de conversion ne peut alors plus transmettre la majeure partie de l'énergie électrique produite qui est dissipée en pertes. Du fait de la présence du convertisseur, la production globale peut alors chuter à zéro même si les lois de commande de type MPPT assurent que le générateur produise sa puissance maximale par rapport aux conditions météorologiques.

Dans les premières installations de fortes puissances, le convertisseur statique était dimensionné à la taille de la puissance crête du générateur PV. Outre le problème énoncé ci-dessus, s'il advenait une défaillance dans la partie conversion, la totalité de l'énergie produite était alors perdue. Partant de ces différents constats, les installations de fortes puissances PV ont alors été partitionnées en plusieurs sous-champs constitués de panneaux PV qui délivraient leurs puissances à des onduleurs de puissance plus faibles. Ces derniers étaient ensuite associés pour constituer une installation de puissance plus importante. Ainsi, si l'un des sous-champs présentait une défaillance, les pertes de production ne touchaient alors que cette partie de la chaîne. De plus, si la puissance de l'installation PV devait augmenter, il suffisait de rajouter autant de sous-champs que nécessaire. En 1997, la tension maximale recommandée délivrée par ces sous-champs (*sorties des générateurs PV*) devait rester inférieure à 300V pour des problèmes d'arcs électriques, de sécurité humaine et matérielle. Etant données les performances des différents composants constituant les onduleurs, le meilleur compromis de dimensionnement des sous-champs en puissance correspondait à des sous-champs d'environ 1kW crêtes délivrant en entrée de chaque onduleur, une tension maximale de 150V sous 7A [II-1].

Le LAAS-CNRS a souhaité renforcer les travaux de recherches dans le domaine de la conversion PV à partir de 1996. Dans ce cadre, nos principaux objectifs étaient de réduire les coûts de ce type d'énergie en augmentant le rendement et la fiabilité de l'ensemble de la chaîne de conversion. Nous avons entrepris des recherches en complément aux recherches en cours dans le domaine des matériaux de conversion menées par d'autres équipes de recherches françaises comme le LGET ou PHASE. Les études effectuées dans ce cadre ont alors portées sur :

- L'optimisation de la production d'électricité photovoltaïque, en maintenant un rendement élevé sur une large plage de fonctionnement,
- La conception de chaînes de conversion modulables, permettant de s'adapter à une large plage de besoins en puissance et ainsi en réduire le coût de conception et de réalisation,
- L'augmentation de la fiabilité de l'ensemble de la chaîne de conversion, afin d'assurer un fonctionnement à long terme,
- L'intégration d'une partie de la chaîne de conversion, dans le but d'en réduire les pertes et donc le coût global.

Les travaux portant sur les trois premiers points sont développés dans ce chapitre. Le point 4 portant sur l'intégration d'une partie de la chaîne sera développé dans le chapitre 4.

II.1.2. Cahier des charges.

Dans le cadre des contrats de recherches financés par le programme CNRS/ADEME ECODEV et le contrat « Recherche et développement » de la région Midi-Pyrénées [II-2, II-3], nous souhaitons créer une

chaîne élémentaire de conversion dédiée à l'énergie PV présentant de meilleurs rendements, une meilleure fiabilité et un prix relativement plus bas que les chaînes existantes.

Dans ce contexte, la nature diluée de l'énergie solaire nous a rapidement amené à penser « modularité » sur la totalité du système de production et de conversion d'énergie. Pour optimiser le fonctionnement et la fiabilité des générateurs PV, nous avons proposé une organisation des modules en sous-champs de puissance limitée. Ces recherches se sont inscrites dans la tendance de discrétisation décrite dans le paragraphe précédent, en développant la notion innovante d'un convertisseur par panneau PV de 50 à 150W crêtes. Par rapport à un convertisseur unique, une architecture modulaire présentait en effet les avantages suivants :

- une taille réduite des générateurs PV permettait un meilleur suivi des points de puissance maximale,
- une interconnexion de chaînes élémentaires en parallèle permettait une connaissance précise de l'état de chaque champ,
- les onduleurs pouvant être implantés à proximité immédiate des chaînes de module, les interconnexions en courant continu étaient réduites.

Dans le but de réduire les coûts de conception et de maintenance des systèmes de conversion d'énergie PV, nous avons choisi de concevoir une chaîne élémentaire de conversion d'énergie PV :

- de faible puissance (*entre 50 et 150 W crête*),
- à structure classique,
- fonctionnant à haute fréquence pour réduire la valeur et la taille des composants passifs, et donc réduire la taille du convertisseur DC-DC,
- à haut rendement de conversion sur une large plage de puissance de fonctionnement,
- forçant le générateur PV à fonctionner à son maximum de puissance,
- pouvant s'associer facilement pour rendre l'association des panneaux en série ou en parallèle plus sécurisée et plus aisée.

Notre base de travail tant en simulation qu'expérimental a donc été d'étudier une chaîne élémentaire de conversion telle que celle décrite en figure 2.2 comportant :

- un panneau PV de 50 à 100 W crête,
- un convertisseur statique DC-DC à structure simple (*abaisseur (buck), élévateur (boost) ou bien abaisseur-élévateur (buck-boost)*) selon la charge,
- un contrôle le plus performant possible.

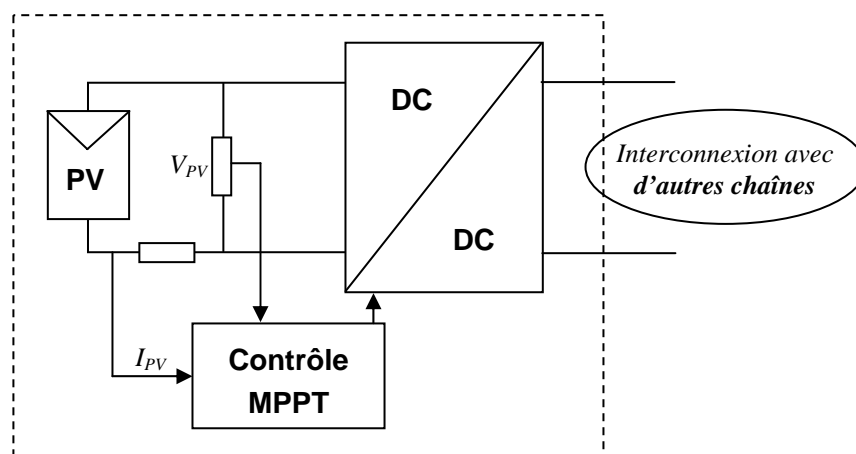


Figure 2.2. Chaîne de conversion photovoltaïque élémentaire conçue et réalisée au LAAS-CNRS.

Ces travaux ont été développés à travers la thèse de M-F Shraif [II-4], qui a développé un premier prototype de DC-DC élémentaire associé à une MPPT analogique innovante. Ils ont été soutenus en

décembre 2002. Nous développons dans ce chapitre les principaux résultats obtenus sur la chaîne élémentaire ainsi que les travaux actuels qui en découlent.

L'associabilité de chaînes de conversion élémentaires a été initiée à travers les travaux de thèse de M. Hugo Valderrama Blavi de l'université Rovira i Virgili [II-5]. Reposant sur la collaboration avec l'équipe du professeur Luis Martinez Salamero, ils ont fait l'objet d'un co-encadrement de thèse entre M. Salamero et moi-même. Ils se sont déroulés en parallèle et en complément des travaux précédents. Une première partie de ces travaux a été soutenue en février 2001. Ces travaux se sont d'abord poursuivis par le séjour post-doctoral de M. Valderrama-Blavi au sein du LAAS-CNRS pour la réalisation de chaînes modulaires, étudier leurs associabilités et tester les différentes structures sur le site du LAAS. Ils continuent aujourd'hui à être développés à l'université Rovira i Virgili par M. Valderrama-Blavi, actuellement Associate Professor et en charge des travaux sur les structures de conversion de puissance alimentées par des énergies renouvelables au sein du laboratoire DEEEA de Tarragone.

II.2 Etudes et réalisations de convertisseurs élémentaires.

II.2.1 Exemple de conception et réalisation d'un convertisseur DC-DC.

II.2.1.1. Rappels du cahier des charges.

Les convertisseurs statiques développés ont été conçus pour s'adapter à un panneau PV. La tension d'entrée du convertisseur DC-DC ne dépasse donc pas 22V (*tension de circuit ouvert du générateur*) et le courant d'entrée est limité à 5A (*courant de court circuit du générateur*). Nous avons souhaité fixer une fréquence de fonctionnement la plus élevée possible pour avoir des tailles et des valeurs de composants passifs les plus faibles. La fréquence de hachage est fixée à 0,5MHz mais peut varier sur une plage de 0,1 à 1MHz. La tension de sortie reste inférieure à 100V pour des problèmes de rendement de conversion. Le convertisseur doit être connecté au plus près du générateur PV (*sur sa face arrière*). Les composants sont soumis à des températures extrêmement variables du fait de leur présence à l'extérieur : de -10°C par temps froid à 80°C par temps chaud (*circuit au repos*). Il faut aussi compter jusqu'à 120 - 130°C par temps chaud, lorsque le hacheur fonctionne. La commutation dure des composants actifs à fréquence de fonctionnement fixe a été un choix du cahier des charges pour conserver la structure classique du convertisseur DC-DC tout en simplifiant la commande MPPT.

Une des structures DC-DC développée est décrite en figure 2.3. La condition de fonctionnement de cette structure élévatrice est que sa tension de sortie soit plus élevée que sa tension d'entrée ($V_{OUT} > V_{PV}$). Le dimensionnement de chaque élément a été dicté par le choix de faire fonctionner le convertisseur Boost en mode de conduction continue, sur la plage de fonctionnement la plus grande possible. Dans ce mode de fonctionnement, l'énergie emmagasinée dans l'inductance L est transférée partiellement et le courant dans celle-ci ne s'annule jamais.

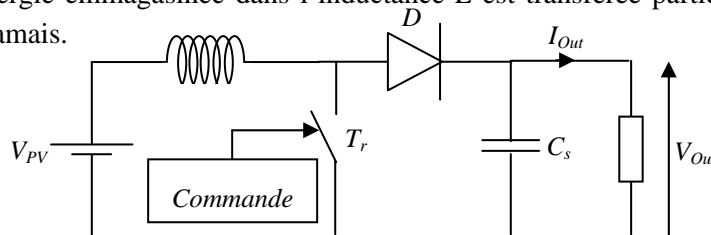


Figure 2.3. Convertisseur DC-DC élévateur de type Boost.

Les relations utilisées pour le dimensionnement sont les relations classiques entre la tension de sortie et celle d'entrée et le rapport cyclique :

$$V_{OUT} = \frac{1}{1-\alpha} V_{PV} \quad (2.1)$$

Une relation analogue lie la valeur moyenne du courant dans l'inductance au courant de sortie :

$$I_{Lmoy} = I_{PV} = \frac{I_{OUT}}{1-\alpha} \quad (2.2)$$

II.2.1.2 Dimensionnement de L et choix du matériau magnétique.

L'inductance est caractérisée par sa valeur en Henry (H), le courant qui la traverse, l'énergie qu'elle peut emmagasiner et sa fréquence de travail. Les critères de choix sont donc les dimensions les plus petites possibles, des pertes faibles et une bonne transmission de l'énergie stockée. Le choix du matériau magnétique permettant de canaliser le flux doit donc avoir une induction de saturation la plus élevée possible et une faible perméabilité. Ainsi, la densité du flux maximale détermine les quantités maximales d'énergies stockée et transmise. Aux fréquences de commutation choisies, l'utilisation de ferrites comme matériaux magnétiques s'impose.

Matériau	Perméabilité	Bmax (KGauss)	Température (°C)	Résistivité (Ω cm)	Fréquences de travail
Fe	250	22	770	10×10^{-6}	60-1000Hz
Si-Fe (<i>non-orienté</i>)	400	20	740	50×10^{-6}	60-1000Hz
Si-Fe (<i>orienté</i>)	1500	20	740	50×10^{-6}	60-1000Hz
50-50 Ni Fe (<i>Grain-orienté</i>)	2000	16	360	40×10^{-6}	60-1000Hz
79 Permalloy	12 à 100	8 à 11	450	55×10^{-6}	1Khz-75Khz
AMORPHOS Alloy B	3000	15-16	370	135×10^{-6}	< 250KHz
AMORPHOS Alloy E	20000	5-6,5	205	140×10^{-6}	< 250KHz
Permalloy Powder	14 à 550	3	450	1	10KHz-1MHz
High Flux Powder	14 à 160	15	360	-	10KHz-1MHz
Kool Mu Powder	26 à 125	10	740	-	< 10MHz
Iron Powder	5 à 80	10	770	1×10^4	100KHz à 100MHz
Ferrite MnZn	750 à 15000	3 à 5	100 à 300	10 à 100	10KHz à 2 MHz
Ferrite Ni Zn	10 à 1500	3 à 5	150 à 450	1×10^6	200KHz à 100MHz
Co- Fe 50%	800	24	980	70×10^{-6}	-

Tableau 2.1. Différentes ferrites du marché [II-6].

Les ferrites présentent de faibles valeurs d'induction (*inférieures à 0,4 T*). Leur champ coercitif est relativement élevé, ce qui permet de les utiliser dans de nombreuses applications. Elles sont de plus assez sensibles à la température et ne peuvent pas être utilisés au-delà de 200°C. A très basse température, le champ coercitif diminue notablement. Cependant, les ferrites sont très largement utilisées, en raison de leur

faible prix. Le tableau présenté ci-dessous reprend différents matériaux magnétiques utilisés en électronique de puissance ainsi que leurs principales caractéristiques.

Comme le convertisseur doit fonctionner en conduction continue (CC) sur la plage de fonctionnement la plus large possible, nous avons fixé la plage de fonctionnement en CC pour un courant de charge I_{OUT} variant de 4% à 100% de sa valeur maximale, soit de 0,2 à 5A. En dessous de 0,2A, le convertisseur ayant de toute façon un rendement trop faible, il devient trop onéreux de le faire fonctionner en CC. La frontière entre conduction continue et conduction discontinue est décrite en figure 2.3.

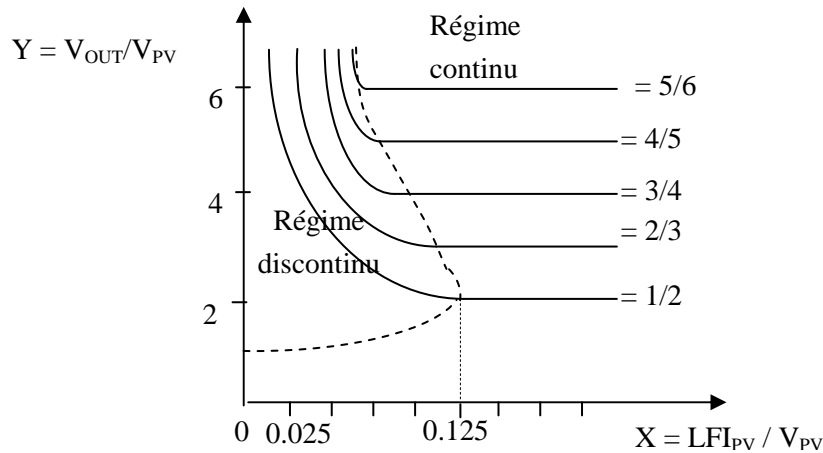


Figure 2.3. Caractéristiques statiques de sortie normalisées d'un Boost [II-7].

La frontière entre CC et conduction discontinue est déterminée par l'équation (2.3). Ainsi, plus L sera grand, plus la plage de conduction continue sera grande.

$$I_{OUT\ min} = \frac{V_{PV}^2}{2LFV_{OUT}} \left(1 - \frac{V_{PV}}{V_{OUT}}\right) \quad (2.3)$$

II.2.1.3. Choix de la technologie des condensateurs.

Un condensateur à l'entrée du Boost est nécessaire afin de protéger le générateur PV des oscillations, à haute fréquence, générées par les commutations du convertisseur. Le dimensionnement de ce condensateur fait encore l'objet d'études pour trouver un compromis entre la protection qu'il assure et la valeur trop élevée, qui change la nature de l'entrée du convertisseur. Un autre condensateur est nécessaire pour filtrer la tension de sortie. Il obéit aux règles de dimensionnement classiques en Electronique de Puissance. Nous avons choisi d'utiliser la même technologie de condensateur pour les deux utilisations.

Un condensateur peut être modélisé par un circuit RLC série. La résistance série nommée ESR (*Equivalent Series Resistance*) représente à la fois les pertes dues aux résistances séries et parallèles de la structure physique du condensateur et varie en fonction de la fréquence :

$$ESR = r_c + \frac{R_p}{1 + (R_p \times C \times \omega)^2} \quad (2.4)$$

C étant de l'ordre du μF , r_c de l'ordre de la dizaine de $m\Omega$, f de l'ordre du MHz, ESR peut être assimilé à r_c . Un condensateur présentant une inductance parasite élevée va induire des dysfonctionnements au sein du convertisseur. De même, une résistance série ou parallèle élevée va induire des pertes supplémentaires.

Ainsi, le choix des condensateurs d'entrée et de sortie parmi les multiples familles de condensateurs (*film, électrolytique, céramique, etc...*) dépend des pertes que l'on tolère suivant son utilisation. Les condensateurs électrolytiques sont évidemment à proscrire pour cette application, étant données leurs caractéristiques fréquentielles. Les mieux adaptés à la montée en fréquence sont les condensateurs film polypropylènes et céramiques multicouches.

Dans notre cas, étant donnée la fréquence élevée à laquelle nous voulons travailler, les plus intéressants sont les condensateurs céramiques multicouches. Trois types de diélectriques sont utilisés selon la précision souhaitée. Les condensateurs dits « class 1 » sont stables en température et dans le temps, le niveau des pertes est très réduit mais leur permittivité relative est faible (5 à 200) et leur coût élevé. Les moins chers sont les « class 2 », pour lesquels le diélectrique varie fortement en fonction de la température, de la tension et de leur âge. Mais leur permittivité relative est très grande (300 à 12000), malgré un angle de perte plus élevé que les «class 1». Ces condensateurs sont donc caractérisés par de grandes capacités volumiques et des courants admissibles élevés. Leur coût est cependant élevé. En effet, il fallait compter 4 Euros en 2001 pour un condensateur 1 μ F/100V.

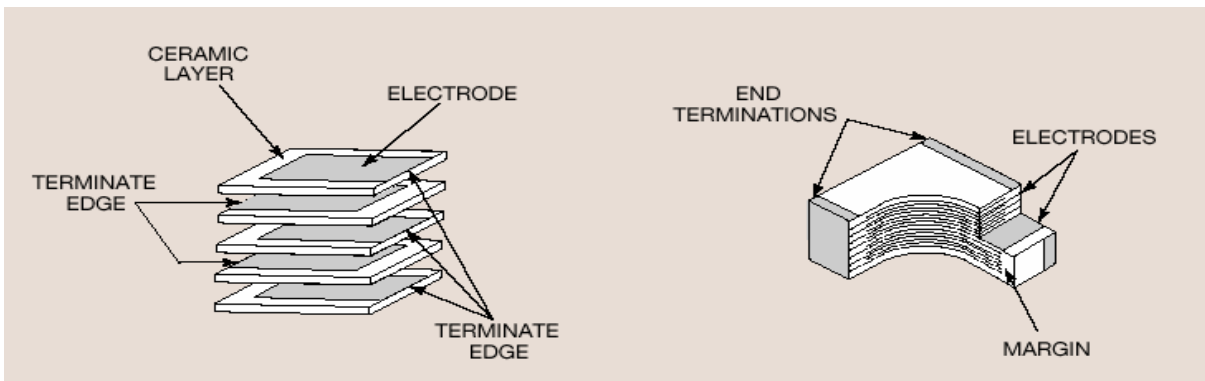


Figure 2.4. Constitution d'un condensateur céramique multicouche [II-8].

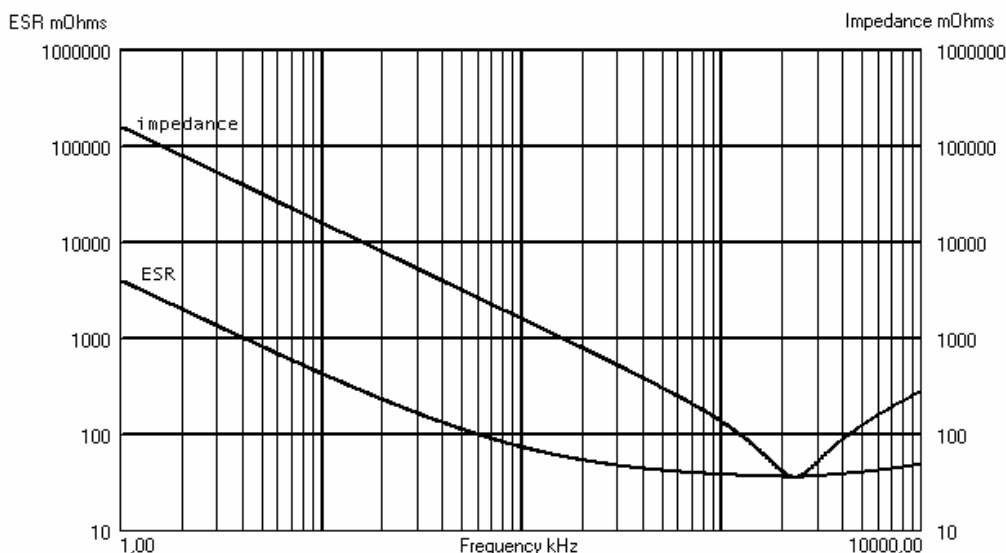


Figure 2.5. Évolution fréquentielle de l'ESR et de l'impédance du condensateur [II.8].

D'après l'évolution fréquentielle de l'impédance des condensateurs à céramique, la fréquence d'utilisation de ces condensateurs ne doit pas dépasser le MégaHertz.

II.2.1.4. Evaluation des pertes totales.

D'après diverses estimations, nous avons évalué la répartition des pertes dans le convertisseur à :

- 50 % liés aux pertes de commutation et de conduction du MOSFET,
- 30 % liés à la diode,
- 10 % liés aux condensateurs de filtrage,
- 5 % liés à l'inductance de lissage,
- 5 % liés à la consommation de la commande MPPT + driver.

Le rendement pour le point nominal est alors estimé à 91 % pour un courant de 3A, sous une tension de 20 V en entrée, un rapport cyclique de 0,5 et une fréquence de commutation de 500kHz.

II.2.2. Résultats expérimentaux.

Divers prototypes ont été réalisés. Un exemple est montré en figure 2.6.

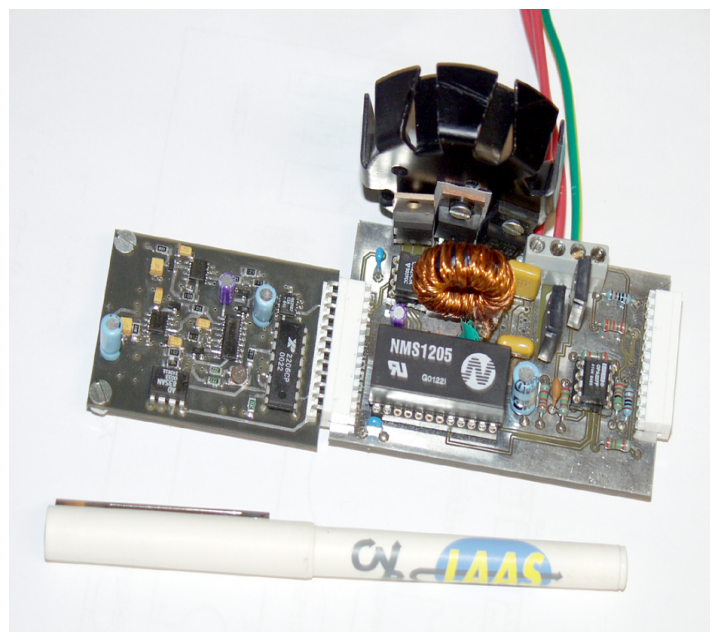


Figure 2.6. Prototype de chaîne élémentaire de conversion d'énergie PV réalisée au LAAS-CNRS, comprenant un convertisseur Boost (à droite) pouvant être alimenté par un ou deux panneaux PV de 50W et piloté par une commande MPPT analogique développée au LAAS (à gauche).

II.2.3. Perspectives d'études.

À ce jour, nous avons réalisé un convertisseur élévateur (*Boost*) respectant le cahier des charges. Sa taille a été réduite et son rendement moyen, mesuré sur le site expérimental du LAAS-CNRS, est de 85%. Des études se poursuivent pour continuer à améliorer le rendement de conversion.

Les deux composants actifs sont ceux qui créent le plus de pertes. L'amélioration du driver de commande du MOSFET devrait apporter rapidement une baisse des pertes en commutation. Il n'est en effet pas facile de trouver des drivers fonctionnant au MégaHertz. La commande va prochainement être implantée dans un composant intégré présentant une consommation réduite par rapport à la réalisation du prototype en CMS, qui nous a permis de valider le fonctionnement de notre propre MPPT. 0,5 à 1W devrait en effet être rapidement récupéré. Ces travaux se déroulent actuellement en collaboration avec EDF, à travers la thèse de

M. Angel Cid Pastor, chargé de reprendre ces études et d'en faire un prototype industriel, destiné à être placé au plus près des panneaux PV.

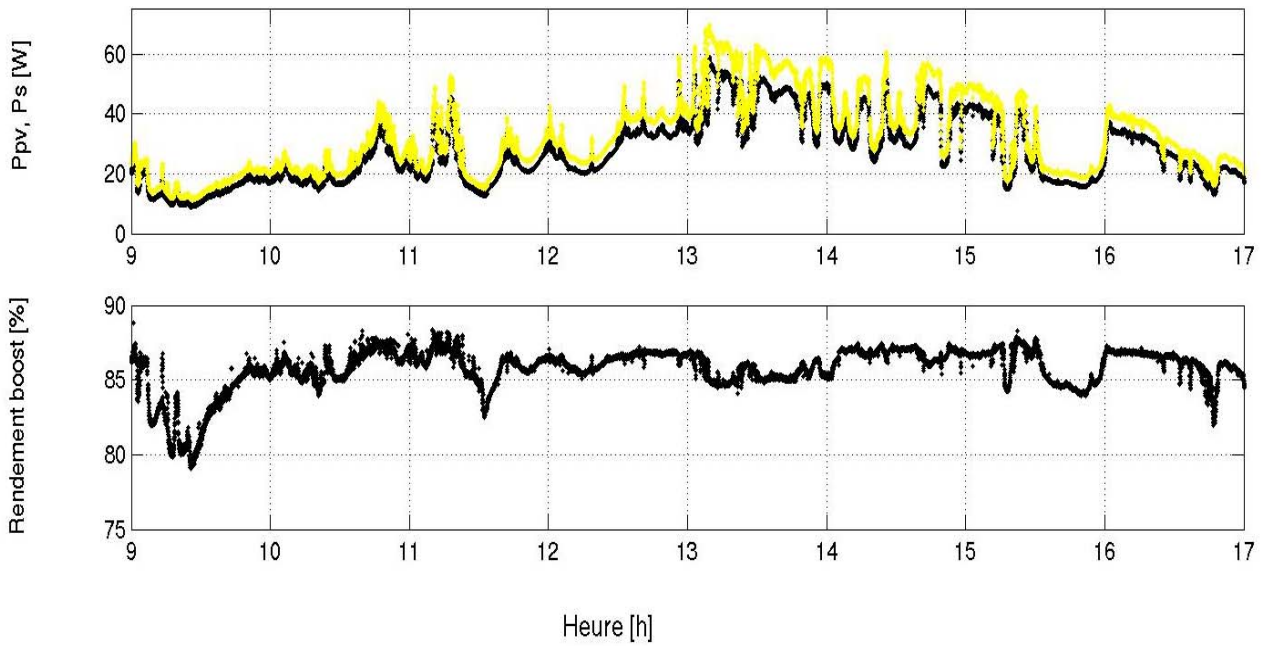


Figure 2.7. Exemple de résultats expérimentaux relevés sur le site expérimental du LAAS. Puissance d'entrée P_{pv} et de sortie P_s d'un Boost sur charge batterie et rendement du convertisseur.

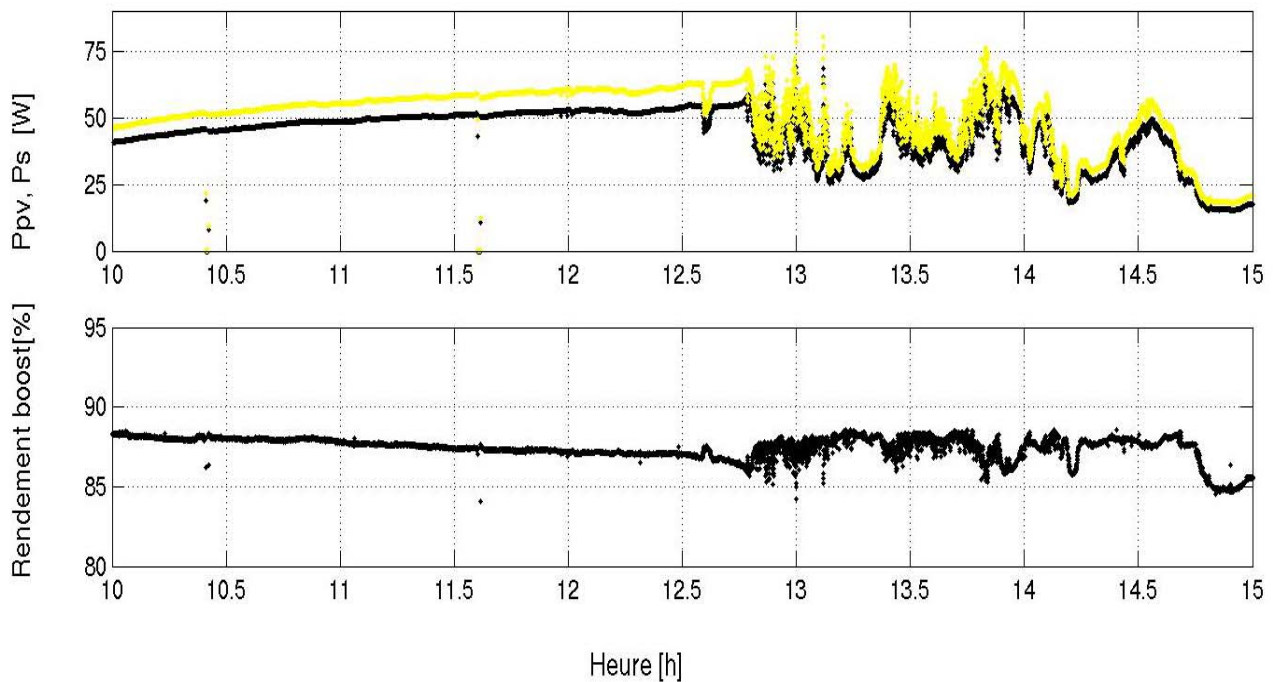


Figure 2.8. Puissance délivrée par un panneau PV, injectée dans une batterie. Rendement du convertisseur Boost.

Les études sur le comportement des inductances et des matériaux magnétiques se poursuivent également en vue de l'acquisition de connaissances pour la réalisation d'inductances intégrées (*chapitre 4*). En effet, une connaissance approfondie du comportement de ces éléments de stockage réalisés en discret dans un contexte réel nous permet d'améliorer au fur et à mesure les différents processus technologiques d'intégration que nous développons en parallèle. Nous envisageons de développer un banc de caractérisation qui puisse mesurer et localiser les pertes de l'élément inductif en fonction de la fréquence à laquelle il est soumis, l'amplitude et la forme des courants et des tensions, la température. La plage de fréquence sera volontairement large pour couvrir diverses applications développées au sein du laboratoire, notamment en RF. Nous donnons quelques exemples d'études de comportements que nous avons déjà réalisés en juillet 2003.

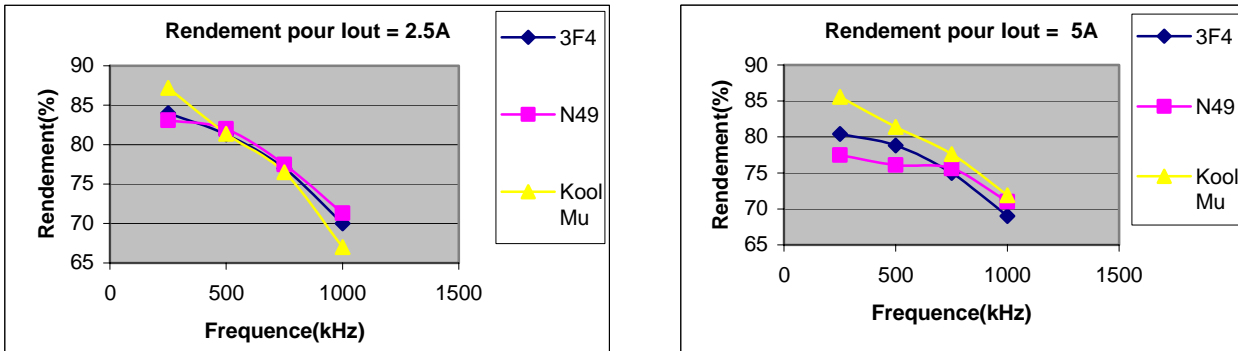


Figure 2.9. Rendement du convertisseur statique avec différentes inductances, en fonction de la fréquence et sous $I_{out} = 2.5A$ et $5A$.

On remarque sur les courbes que la plage d'utilisation possible de chaque matériau en fréquence et en courant n'est pas la même. Le matériau 3F4 présente de meilleurs résultats aux fréquences inférieures à 750 kHz alors que le matériau N49 prend le relais à partir de cette fréquence et jusqu'à 1MHz. Une deuxième série de mesures réalisée sur un nouveau prototype permet de comparer le rendement de deux inductances de valeur identique, mais dont les ferrites sont différentes.

Rendement de deux inductances réalisées avec des ferrites différents

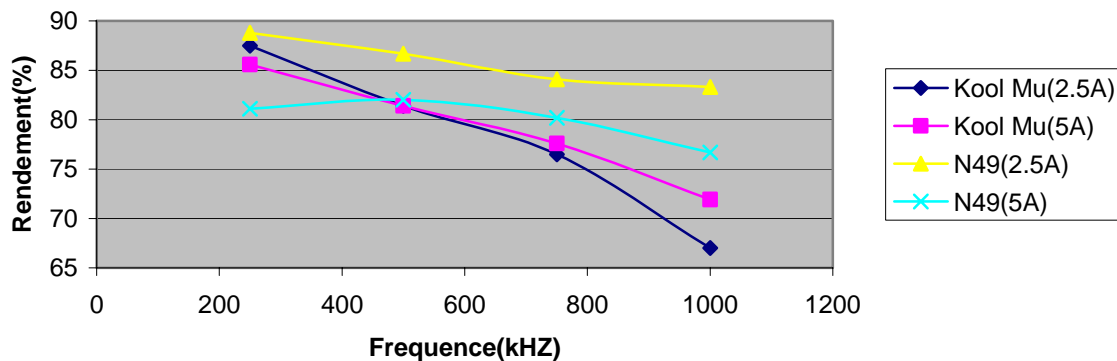


Figure 2.10. Comparaison du rendement d'inductances de valeurs équivalentes en fonction de la fréquence.

On voit bien que le rendement est bien meilleur avec l'inductance N49, surtout à 2.5A et que ce matériau surpasse le Kool Mu à 5A, à partir de 500kHz. Le matériau N49 présente une quasi-constance du rendement, quels que soient la fréquence et le courant d'utilisation, ce qui le rend meilleur vis-à-vis de nos critères de dimensionnement.

De plus, on peut distinguer sur la figure 2.11 une perte de rendement de 1% entre les mesures où le courant était croissant et les mesures où il était décroissant. Ceci est lié à une élévation de température de fonctionnement au fur et à mesure des pertes générées. Pour éviter ce phénomène, nous pensons modifier le processus de mesures en tenant compte des constantes thermiques des pertes.

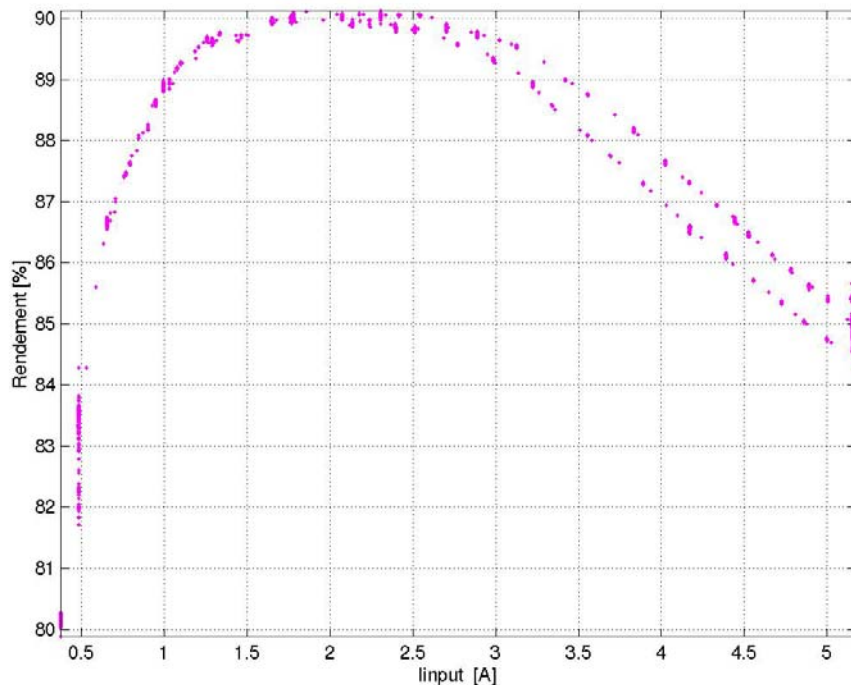


Figure 2.11. Rendement en fonction du courant d'entrée à 500kHz.

II.3. Concept de MPPT.

Par définition, une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un générateur PV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quels que soient les conditions météorologiques (*température et irradiation*), et quelle que soit la tension de la batterie, la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (V_{OPT} , I_{OPT}). Pour cela, plusieurs systèmes ont été publiés dans la littérature. Nous en avons fait un classement en fonction de leur principe et de leur performance. Ainsi, nous avons pu constater que malgré la quantité d'études menées dans ce domaine, beaucoup présentaient des imperfections lorsqu'elles étaient en situation réelle.

Ces constats nous ont amené à développer notre propre commande MPPT, répondant au cahier des charges que nous avons établi pour la chaîne élémentaire. Nous rappelons dans cette partie les principes généraux des MPPT existantes ainsi que les principaux travaux que nous avons effectués dans ce domaine.

II.3.1. Fonctionnement d'un générateur PV à sa puissance maximale.

La conception de systèmes photovoltaïques optimisés doit prendre en compte la nature même de la source. Pour un générateur photovoltaïque (PV), la production de puissance varie fortement en fonction de l'éclairement, de la température, mais aussi du vieillissement global du système. Il faut donc arriver à concilier ces comportements avec ceux propres à une charge, qu'elle soit de nature continue (DC) comme des batteries ou bien alternative (AC) comme le réseau électrique 240V/50Hz. Dans ces conditions, pour

qu'une connexion *source-charge* soit possible, un point de fonctionnement correspondant à l'intersection des deux caractéristiques électriques doit exister. Pour mieux comprendre ceci, prenons le cas d'une connexion directe entre un générateur PV et une charge résistive R , comme illustré dans la figure 2.12.

Comme nous pouvons le constater sur la figure 2.12b, le fonctionnement du générateur dépend fortement des caractéristiques de la charge avec laquelle il est associé. En effet, pour différentes valeurs de R , l'adaptation optimale se produit pour un seul point de fonctionnement particulier, nommé Point de Puissance Maximal (*PPM*). Celui-ci correspond à la puissance maximale que peut délivrer un générateur PV pour une courbe $I(V)$ donnée. Ainsi, lorsque l'on réalise une connexion directe *source-charge*, le rendement de l'ensemble est alors optimal lorsque le système fonctionne à son PPM.

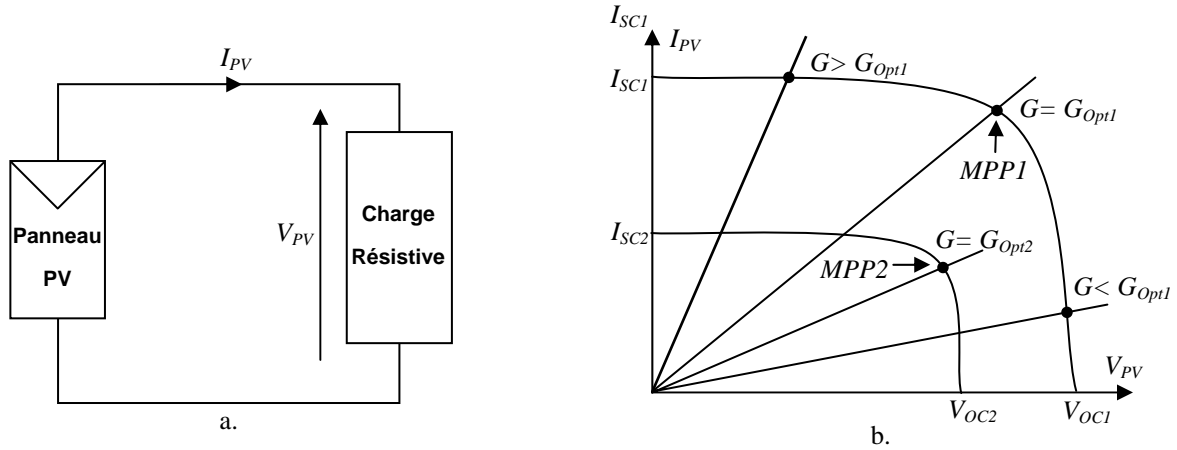


Figure 2.12. a. Connexion directe entre un générateur PV et une charge résistive.

b. Différents points de fonctionnements résultant de l'association d'un panneau PV sous deux éclairements et d'une charge résistive variable.

Pour que le générateur fonctionne le plus souvent possible dans son régime optimal, la solution communément adoptée est alors d'introduire un convertisseur statique qui joue le rôle d'adaptateur source-charge. Ainsi, le générateur est alors susceptible de délivrer sa puissance maximale correspondant à :

$$P_{MAX} = V_{OPT} \times I_{OPT} \tag{2.5}$$

Dans laquelle V_{OPT} et I_{OPT} représentent respectivement les tensions et courants optimaux du générateur PV pour une courbe $I(V)$ donnée. Considérons l'exemple de la figure 2.3, correspondant à un convertisseur DC-DC élévateur, et pouvant être utilisé comme adaptateur. L'adaptation entre la source et la charge est réalisée grâce à la variation du rapport cyclique α . En effet, si nous supposons que le Boost fonctionne en conduction continue et si nous considérons que le rendement du Boost avoisine les 100%, alors les relations électriques entre les grandeurs d'entrée du convertisseur, (*ie.* I_{PV} et V_{PV} du générateur PV) et de sortie du convertisseur, (I_{OUT} et V_{OUT}) ne dépendent que du rapport cyclique α et peuvent s'exprimer par les formules simples (2.1) et (2.2). L'adaptation optimale est alors réalisée pour un α donné, lorsque I_{PV} et V_{PV} sont égaux respectivement à I_{OPT} et V_{OPT} , soit pour une résistance optimale R_{opt} du générateur, répondant à l'équation suivante :

$$R_{OPT} = \frac{V_{OPT}}{I_{OPT}} = (1 - \alpha)^2 \cdot \frac{V_S}{I_S} = (1 - \alpha)^2 \cdot R \tag{2.6}$$

Ainsi, la connexion entre une source et une charge peut être optimisée par la variation de α pour que, d'un côté, le générateur puisse fonctionner à R_{OPT} et, d'un autre côté, que la charge puisse varier à sa guise, dans la mesure où le point d'intersection *source-charge* existe. Il est alors à remarquer que si l'étage

d'adaptation est assuré par un seul convertisseur, une seule grandeur électrique aux bornes de la charge (*courant ou tension*) peut être régulée. Ceci impose une hypothèse de fonctionnement sur la charge qui doit accepter un courant quelconque si sa tension est imposée.

Pour que l'adaptation se fasse automatiquement à tout instant, un certain nombre de lois de commande ont été élaborées. Toutes ont pour objectif d'effectuer une recherche automatisée du Point de Puissance Maximal du système, en se basant sur la nature convexe des courbes de puissance du générateur PV ou, plus généralement, d'une source non-linéaire. Ce type de commande est connu sous le nom de « **commande extrême ou régulateur extrême** ».

Les principes de base de ce type de régulateur sont connus depuis longtemps et ont été développés dans diverses applications, notamment pour des commandes de vol en aéronautique. La régulation extrême est en effet une solution de régulation possible pour les systèmes ne rentrant pas dans le cas classique où, pour un régulateur ayant X_s comme grandeur de sortie et X_e comme grandeur d'entrée, une seule mesure permet de connaître X_s par rapport à X_e . C'est le cas par exemple d'un système où la fonction reliant X_s et X_e se modifie au cours du temps, et ce de manière aléatoire. Dans le cas d'une régulation extrême, pour connaître la réponse en sortie, une des solutions consiste à déplacer le signal d'entrée X_e afin d'établir la relation entre X_s et X_e à un instant donné. On peut ainsi appréhender si X_s évolue ou non vers l'extrême. Dans la littérature, le déplacement de X_e porte le nom **d'action de recherche**. L'information obtenue à l'aide de cette action permet de faire évoluer X_e pour que X_s atteigne sa valeur extrême. Ceci est nommé **l'action de travail du système**. Il est à remarquer que l'action de recherche constitue une perturbation dans le régulateur extrême, provoquant ainsi un mouvement oscillant autour de l'extremum. De plus, elle permet de connaître d'une manière plus ou moins approchée la pente (*ou le signe*) d'une caractéristique extrême. L'action de travail a pour but de commander le système pour que X_s atteigne sa valeur extrême.

Dans le domaine de la conversion d'énergie, ce type de régulation correspond aux commandes nommées MPPT (*Maximum Power Point Trackers*). Ainsi, associées à un ou plusieurs convertisseurs statiques assurant l'interface de puissance, elles permettent au générateur d'énergie de produire une puissance maximale, le plus souvent possible.

Diverses publications sur des commandes assurant un fonctionnement de type MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) apparaissent régulièrement dans la littérature depuis 1968, date de publication de la première loi de commande [II-8, II-9]. Le grand nombre de publications dans ce domaine nous a amené à effectuer une classification des différentes MPPT existantes et à les regrouper selon leur principe de fonctionnement [II-10, II-11]. Cette classification avait pour but de repérer la commande MPPT qui pourrait répondre à notre cahier des charges. Ainsi, en plus du principe général de fonctionnement, cette classification s'est effectuée selon des critères comme la précision de la recherche ou sa rapidité pour en faire une évaluation comparative. Il est à noter qu'une première évaluation comparative avait été faite par A. S. Kislovski en 1993 [II-12].

II.3.2. Rappel des différents types de MPPT rencontrés dans la littérature.

II.3.2.1. Les premières commandes MPPT.

Dans les premières MPPT créées dans les années 1970, l'algorithme mis en œuvre était relativement simple, étant données les capacités des micro-contrôleurs disponibles à cette époque et les principales applications, destinées alors au spatial. Appliquée au photovoltaïque, son principe a d'abord été décrit par A.F. Boehringer [II-9]. La commande est basée sur un algorithme de contrôle adaptatif, permettant de

maintenir le système à son point de puissance maximum (PPM). Ce dernier est décrit en figure 2.13 et peut être implanté entièrement en numérique. Il consiste à calculer la puissance à l'instant t_i à partir des mesures de I_{PV} et V_{PV} , et de la comparer à celle stockée en mémoire, correspondant à l'instant t_{i-1} . De là, un nouveau rapport cyclique α est calculé et est appliqué au convertisseur statique. Un exemple d'algorithme MPPT équivalent à celui de la figure II.13 est décrit en [II.3] pour l'énergie éolienne.

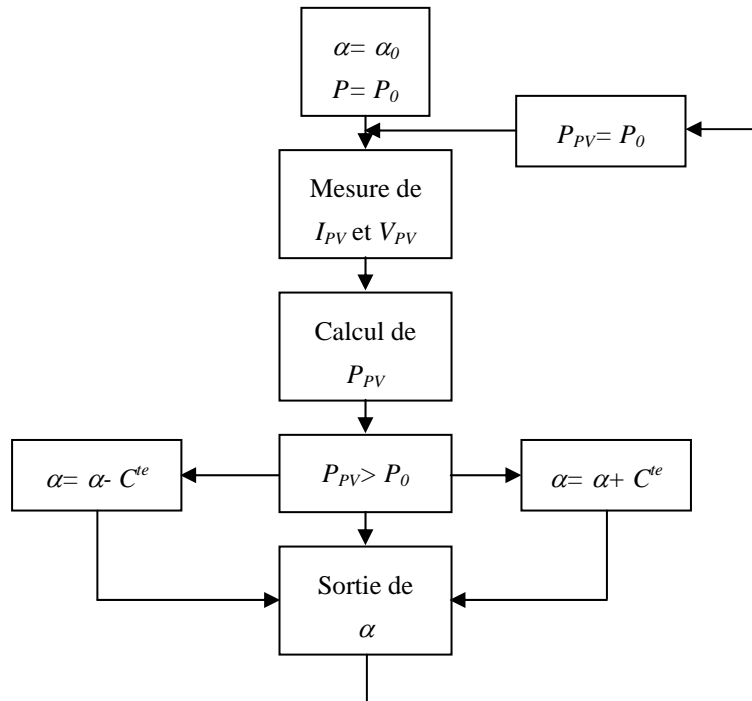


Figure 2.13. Principe d'une MPPT numérique [II-9, II-13].

Récemment, ce type d'algorithme simple a été implanté sur un micro-contrôleur 8051 de faible prix, en vue d'effectuer une association parallèle de convertisseurs nommée « Parallel Power Conversion Technique » (PPCT). Mais, les limites de la commande MPPT n'y sont pas traitées. La recherche du PPM démarre à partir de la tension de circuit ouvert et le temps de recherche du PPM est garanti toutes les 1,5 secondes.

II.3.2.2. Les commandes MPPT destinées aux applications spatiales.

L'ensoleillement dans les applications spatiales présente un comportement prévisible, contrairement aux applications terrestres, soumises aux heures du jour et aux données météorologiques. Pour cela, un certain nombre de simplifications sur l'évaluation de la puissance délivrée par le générateur photovoltaïque peuvent être faites.

La commande MPPT de type numérique développée par Kevin kyeong-il Choi et al. [II-8] pour le CNES nécessite un PIC ou un micro-contrôleur assurant un temps de calcul de la MPPT toutes les secondes. Elle est destinée avant tout à des applications spatiales de type chargeur de batterie. Pour diminuer le nombre de capteurs, une seule grandeur électrique en sortie du générateur PV est captée, le courant de la source PV. En effet, on fait l'hypothèse que la variation de la tension optimale, dans les conditions de fonctionnement, est faible. Dans ce cas, la variation de puissance optimale est alors similaire à la variation du courant optimal. Cela induit intrinsèquement une perte du rendement global de la chaîne de conversion, par l'erreur effectuée sur le PPM à tout instant (entre 5 et 10% selon les configurations). Cependant, cette commande relativement simple présente l'avantage d'une grande stabilité et peut être performante si les conditions de température ne

varient pas trop. Ainsi, la variation maximale de V_{opt} entre un éclairement nul et un éclairement maximal est inférieur à 5%.

Ce type de commande ayant un seul capteur pour déterminer une image de la puissance délivrée par le générateur se base sur des hypothèses simplificatrices qui ne peuvent pas être faites sur des systèmes terrestres où l'éclairement et la température varient dans de larges proportions.

II.3.2.3. Les commandes MPPT à algorithmes performants.

Le type de commande MPPT la plus décrite dans la littérature est basé sur la mesure du courant et de la tension de la source. Deux types d'implantation existent (*analogique ou numérique*) en fonction de la complexité des algorithmes implantés.

Les premiers travaux relatant d'une implantation analogique performante ont été décrit en 1988 par Salameh [II-14, II-15]. Malgré un algorithme performant, permettant l'oscillation du système autour du point de puissance maximum, dans des conditions de variations lentes d'éclairement, cette commande présente un compromis entre sa rapidité et sa précision (*faible taux d'oscillations et bonne dynamique en cas de changement d'éclairement ou de charge*). Ainsi, l'implantation analogique de ce type de commande a longtemps été exclue.

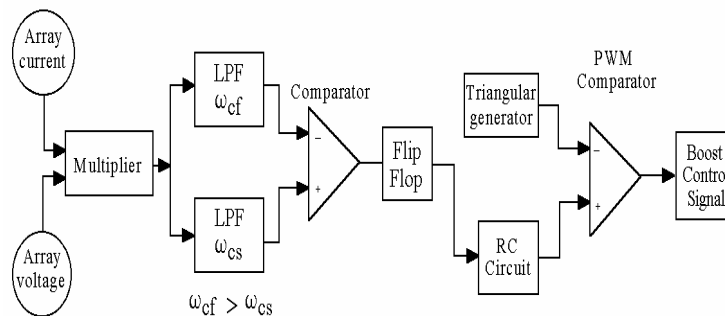


Figure II.14. Principe de la MPPT analogique de Salameh.

L'augmentation des fréquences de travail des convertisseurs statiques a créé un nouveau regain d'intérêt pour une implantation analogique de ce type de commande. En effet, l'évaluation de la situation du point de fonctionnement par rapport au PPM ne nécessite aucun calcul pour son évaluation. Sur cette base, les travaux que nous avons développés au LAAS-CNRS ont aboutis à une amélioration de l'algorithme présenté en figure 4. En particulier, ils résolvent le problème du compromis rapidité-précision.

II.3.2.4. Les Commandes MPPT numériques performantes.

La plupart des commandes MPPT récentes sont de type numérique. L'algorithme implanté est plus ou moins lourd selon la précision de modélisation du système, la robustesse et la rapidité de la boucle de commande.

La commande MPPT de type numérique proposée par M. Matsui et basée sur la mesure des tensions de sortie et d'entrée d'un Boost. Ainsi, connaissant le comportement typique du convertisseur statique, on en déduit la valeur du rapport cyclique qui permet de faire la meilleure adaptation source-charge. Pour arriver aux résultats décrits dans l'article, l'hypothèse de fonctionnement du Boost est basée sur les équations théoriques ne tenant pas compte des pertes liées au convertisseur. En effet, ces pertes entraînent une

correction nécessaire sur le rapport cyclique théorique pour atteindre la meilleure adaptation d'impédance. Ce type de commande simple est ainsi valable à base fréquence et puissance élevée. Mais, lorsque la fréquence du système de conversion de puissance augmente, les erreurs faites sur le rapport cyclique, pouvant être importantes, entraînent des pertes en rendement importantes. De plus, il faut s'assurer par le dimensionnement du convertisseur que l'on est en mode de conduction continue. On note par ailleurs que les résultats expérimentaux présentent des surtensions très importantes, nécessitant des sur-dimensionnements de la partie puissance (*plus de deux fois les tensions nominales en régime permanent*).

Une autre alternative est présentée dans les travaux développés par K. Hussein [II-16] et C. Hua [II-17]. Pour ce type de commande, un PC ou un micro-contrôleur est nécessaire afin de déterminer la puissance de la source ainsi que son sens de variation. Dans ce cas, ces systèmes ont une rapidité de réponse liée aux temps de calcul des algorithmes implantés. Ainsi, les échelles de temps sur les résultats expérimentaux présentés dans ces papiers sont de 50s pour [II-16] et 100s pour [II-17]. Ces commandes supposent que les systèmes PV ont une dynamique de variation relativement lente. Cette hypothèse n'est pas valable lorsque l'on destine ces systèmes à des applications terrestres sous des climats nuageux. Il est en effet parfois très difficile pour ces commandes de traiter le cas d'éclairement inhomogène qui rend en plus la courbe de puissance du générateur plus complexe.

II.3.3. Synthèse.

La plupart des commandes MPPT rencontrées dans la littérature adoptent comme fonctionnement celui décrit dans la figure ci-dessous. Au démarrage du système, la recherche du PPM se fait progressivement, en cherchant le premier maximum.

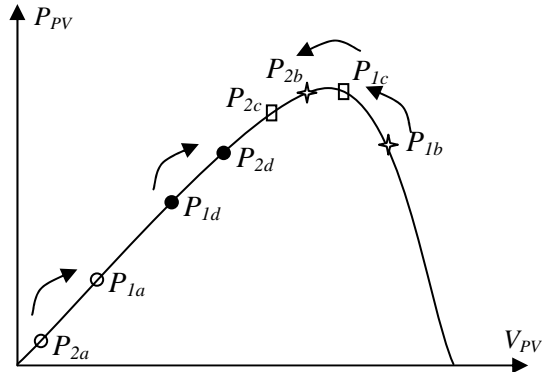


Figure II.15. Principe de fonctionnement d'une commande MPPT.

Cependant, pour arriver à converger dans de bonnes conditions, quel que soit l'algorithme, il faut que les courbes de puissance délivrées par le générateur soient constantes ou lentement variables. Si cette hypothèse n'est pas respectée (*changements brutaux des conditions de fonctionnement*), alors il est à noter que les problèmes suivants peuvent se poser :

- **La puissance délivrée par le générateur peut présenter plusieurs maximums.** Ceci peut se produire, en particulier, lorsqu'il est le fruit de cellules PV associées en grand nombre en série et en parallèle avec leur protection respective.
- **Des changements brutaux d'éclairement et de charge.** Ainsi, le générateur peut à tout instant avoir sa courbe de puissance modifiée ainsi que son PPM, comme l'illustre la figure II.16.
- **Les pertes liées à la commande.** En effet, de part la nature oscillatoire de cette dernière autour du PPM, mais aussi dans les transitoires, il peut survenir un certain nombre de contre-performances.

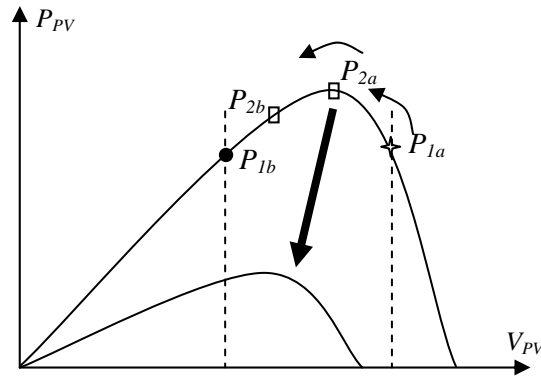


Figure II.16. Changement d'éclairage et conséquences sur les courbes de puissance d'un générateur PV ainsi que sur l'adaptation source-charge.

II.4. Travaux menés sur les commandes MPPT.

II.4.1. Synthèse d'une MPPT analogique à haut rendement.

La synthèse des commandes MPPT existantes, effectuée dans les paragraphes précédents, nous a permis de connaître les avantages et les inconvénients de chaque type de contrôle (*tableau 3.1*). Pour les chaînes PV élémentaires de conversion électrique d'une centaine de watts, qui représentent pour nous les briques élémentaires de conversion, aucune commande MPPT existante ne satisfaisait vraiment à notre cahier des charges. En effet, la plupart des commandes numériques n'étaient pas adaptées à des changements brutaux de conditions de fonctionnement ou à des fonctionnements à haute fréquence. Les commandes analogiques, quant à elles, présentaient des rendements trop faibles, principalement liés aux taux d'oscillations trop importants sur les grandeurs de tension et de courant principaux.

Dans le cadre de la thèse de M. Shraif, les travaux ont débuté au LAAS-CNRS en 1998. Ils avaient pour but de mettre au point une nouvelle commande MPPT analogique palliant les principaux inconvénients des autres MPPT. Les performances de ce circuit de contrôle ont fait l'objet d'un dépôt de brevet CNRS effectué le 16 janvier 2001 et publié le 17 juillet 2002. Cette commande, nommée MPPT intelligente (*IMPPT*), qui a tout d'abord été conçue pour des générateurs PV, peut être généralisée à d'autres sources d'énergie, possédant de fortes non linéarités et un comportement aléatoire, comme par exemple l'énergie éolienne.

La commande IMPPT permet avant tout d'effectuer un très bon compromis entre une recherche rapide du point de puissance maximum (*PPM*) et le taux d'oscillation autour du PPM, dans le cas d'oscillations de très faibles amplitudes, ce qui n'est pas le cas dans la plupart des commandes MPPT analogiques existantes. Cette commande peut effectuer une rapide convergence vers un nouveau PPM après avoir détecté un changement de PPM, et ce qu'elle qu'en soit la cause. Cette recherche est très rapide et très fiable par rapport aux commandes existantes.

Le principe de cette commande est indépendant de la structure de conversion et il peut s'appliquer à diverses structures de convertisseurs statiques. Ainsi, les résultats expérimentaux que nous avons obtenus au chapitre précédent montrent un fonctionnement correct sur des convertisseurs statiques autant éleveurs qu'abaisseurs de tension.

Il est à remarquer que cette commande ne nécessite pas de capteurs supplémentaires spécifiques pour identifier les changements de PPM. En effet, elle utilise les capteurs de courant et de tension déjà utilisés pour évaluer la puissance instantanée du générateur PV. Étant donnée l'évolution des convertisseurs statiques vers des hautes fréquences pour réduire les pertes et les dimensions des composants passifs, nous recherchons depuis le début de ces travaux une commande à dynamique très rapide. Pour cela, nous avons fait le choix d'implanter cette commande avec des circuits analogiques, afin de pouvoir répondre aux contraintes de notre cahier des charges. Le principe de cette commande peut cependant être reproduit en numérique et s'adapter moyennant quelques études supplémentaires à un système existant comprenant soit un micro processeur soit un PC.

II.4.2. Perspectives.

Nous avons vu qu'une implémentation analogique permet de réduire le coût économique du circuit. De plus, les capteurs nécessaires à l'évaluation de la puissance sont peu chers et peuvent être facilement adaptés à ce type de système de contrôle analogique, les valeurs issues de ces capteurs n'ayant pas à être filtrées pour donner des valeurs moyennes comme en numérique.

Cependant, nous avons pu constater, lors du post-doctorat de M. Ramon Leyva Grasa, que l'algorithme de la MPPT mise au point par le LAAS-CNRS utilise une bascule T par front descendant, qui présente quelques problèmes d'instabilité face à l'apparition de variations brusques de température ou d'éclairement. Pour résoudre ce problème, nous avons mis au point un nouveau mécanisme de détection de perte de stabilité et d'initialisation des filtres. Cependant, ce dernier est peu efficace quand se produisent de brusques variations d'éclairement. Des travaux supplémentaires ont été menés pour améliorer cette détection. Ils sont actuellement en cours de publication.

II.5. Association. Modularité.

En parallèle des travaux effectués sur la chaîne élémentaire, autant sur la partie conversion de puissance que commande, des travaux ont été réalisés sur l'associabilité des chaînes entre elles dans le cadre de la thèse de M. Valderrama-Blavi, ainsi que dans les différents travaux menés ultérieurement durant son post-doctorat puis depuis sa réintégration au sein de l'équipe de recherche de Tarragone. Étant données l'ampleur de ces travaux, nous citons ici qu'un exemple d'association en parallèle de modules de conversion de puissance élémentaires. Des compléments d'information peuvent être trouvés dans les différentes publications inhérentes à ces travaux.

II.5.1 Notion de source de puissance.

Dans le cas de source d'énergie PV, et plus généralement de sources non-linéaire, dont l'entrée est contrôlée en puissance, la notion de source de puissance peut être introduite. Ce concept appelé LFR (*Loss Free Resistor*) a été étudié et modélisé sous la forme d'un quadripôle, dont l'entrée se comporte comme une caractéristique $I-V$ résistive et dont la sortie est une fonction de la puissance absorbée en entrée. Ces notions étant bien développées dans la thèse de M. Valderrama-Blavi [II-5], seules les notions principales de ce concept sont présentées ici. Un exemple de réalisation de structure LFR basée sur un transformateur contrôlé en puissance est présenté en figure 2.17.

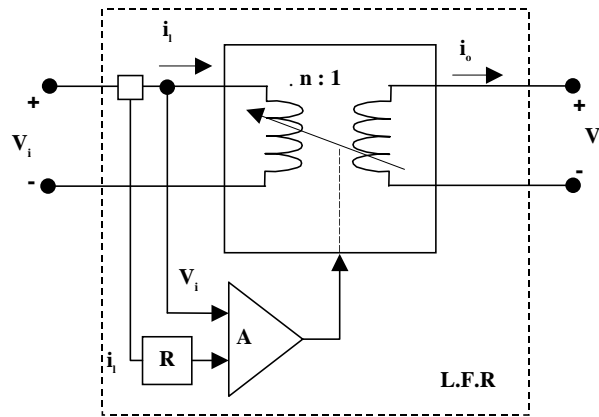


Figure 2.17. Exemple de réalisation de structure LFR basée sur un transformateur contrôlé.

Les équations caractérisant une structure LFR sont données par :

$$\begin{aligned} (1) \quad & v_i = R \cdot i_i \\ (2) \quad & P_i = R \cdot i_i^2 = P_o \\ (3) \quad & P_o = v_o \cdot i_o = P \end{aligned}$$

avec :

- P_i , V_i et I_i représentant respectivement la puissance, la tension et le courant d'entrée d'un convertisseur statique,
- P_o , V_o et I_o représentant respectivement la puissance, la tension et le courant de sortie,
- R représentant la résistance équivalente de la source.

Il est à signaler que la structure classique Buck-Boost a naturellement un comportement de LFR qui est directement exploité dans notre cas.

II.5.2. Concept du AC-LFR.

Une structure LFR adaptée à une sortie alternative et nommée AC-LFR est décrite en figure 2.18.

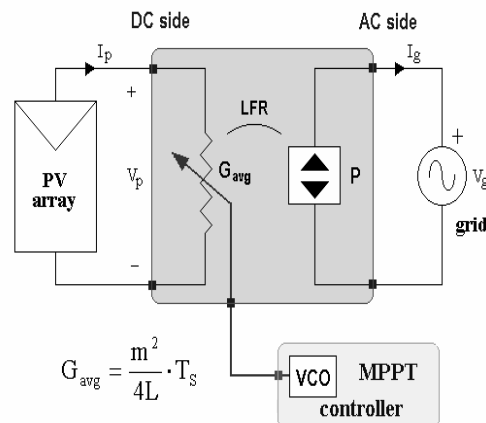


Figure 2.18. Structure AC-LFR appliquée au photovoltaïque.

Les convertisseurs Buck-Boost en mode de conduction continue ont par nature des comportements de LFR. Pour en faire des structures AC-LFR, nous lui avons associé une cellule «Push-Pull», permettant le

redressement d'une alternance. La figure 2.19 présente le schéma électrique complet, correspondant à une structure AC-LFR.

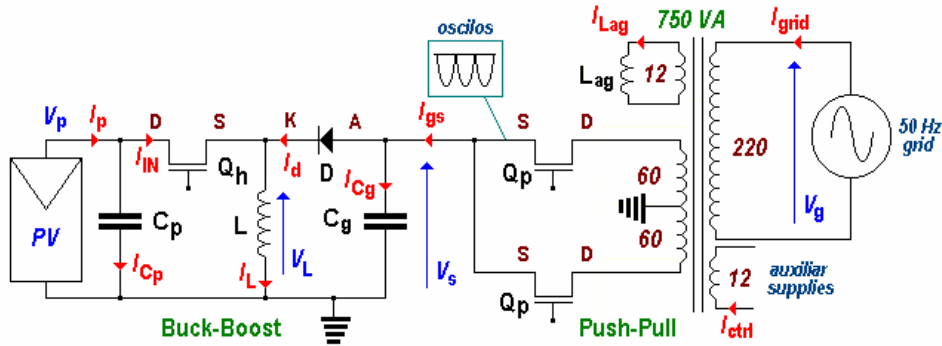


Figure 2.19. Schéma d'un convertisseur AC-LFR.

Appliqué à ce cas, les équations (1), (2) et (3), correspondant à une structure LFR classique, deviennent :

$$\begin{aligned}
 (4) \quad & I_p = G_{Avg} \cdot V_p \\
 (5) \quad & P_{DC} = V_p^2 \cdot G_{Avg} = \langle P_{AC}(t) \rangle \\
 (6) \quad & P_{AC}(t) = V_g(t) \cdot I_g(t) = 2 \cdot P_{DC} \cdot \sin^2(\omega_0 t)
 \end{aligned}$$

Un exemple des formes d'ondes des tensions, courants et puissances délivrés à un réseau est présenté en figure 2.20.

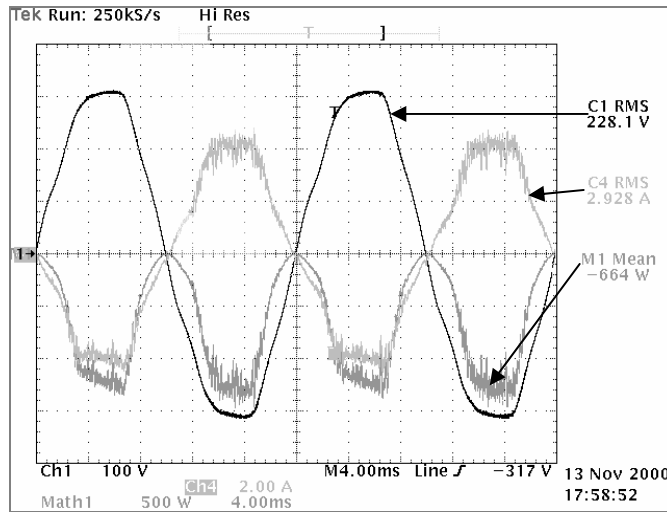


Figure 2.20. Formes d'ondes en sortie du AC-LFR.
(Ch1 : 100V/div Ch2 : 2A/div Ch3 : 500W/div. Temps : 4ms/div).

On remarque que les structures de type AC-LFR travaillent comme des sources de puissance et présentent l'avantage de travailler même à faible tension. Cette particularité est due au fait que ces structures sont basées sur des convertisseurs de type « Buck-Boost » ; en effet, les onduleurs classiques sont dérivés de structures de type Buck, qui ne peuvent pas travailler dans toutes les conditions d'ensoleillement, car la tension du panneau doit être supérieure à celle délivrée au réseau.

Enfin, on notera que les structures AC-LFR n'utilisent qu'un seul interrupteur fonctionnant à haute fréquence par module PV pour contrôler la conversion DC-AC et assurer la fonction MPPT.

II.5.3. La structure NAC-LFR.

Pour discrétiser au maximum la chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque, en vue d'augmenter son rendement et sa fiabilité, une parallélisation de N convertisseurs Buck-Boost ayant leur propre MPPT a été effectuée. Une des structures globales nommée N AC-LFR est décrite en figure 2.21.

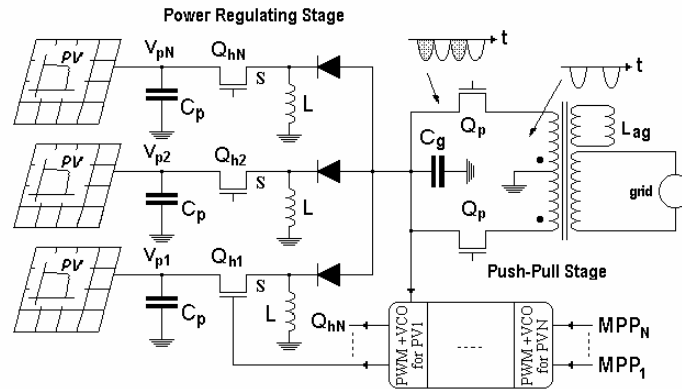


Figure 2.21. Schéma d'un convertisseur N AC-LFR.

Cette solution permet une réduction de $N-1$ structures Push-Pull, ainsi que d'autant de transformateurs. On peut de plus noter que le PPM de chaque panneau peut être poursuivi indépendamment.

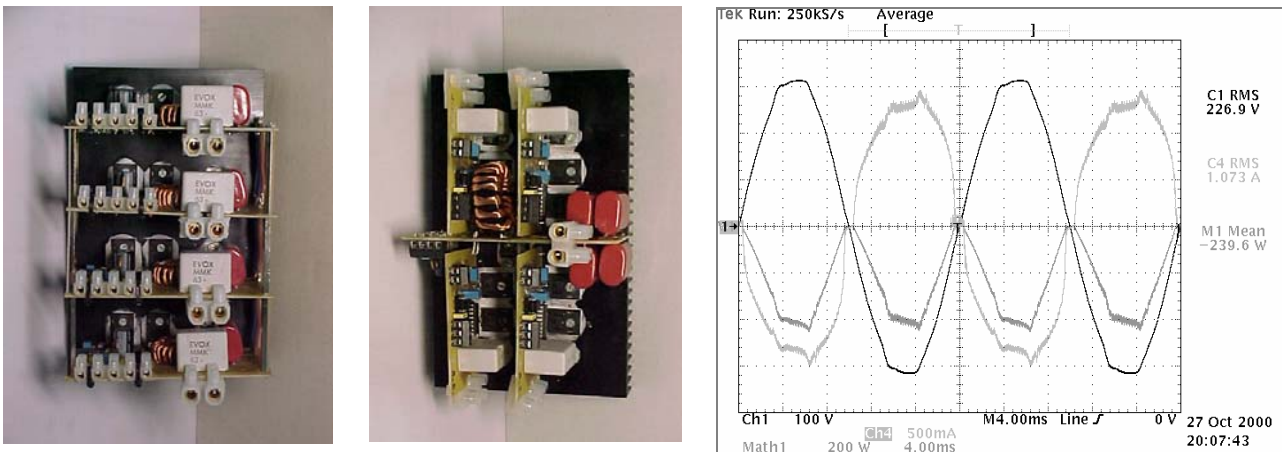


Figure 2.22. Réalisation d'un convertisseur N AC-LFR ($N=4$) et formes d'ondes en sortie d'un N AC-LFR. (Ch1: 100V/div Ch2 : 2A/div Ch3 : 500W/div 4ms/div).

II.6. Conclusions et perspectives.

Dans l'avenir, il nous semble que pour continuer à réduire les pertes liées à la connectique (*entre les panneaux PV, entre les cellules elles-mêmes mais également entre le générateur PV et le convertisseur statique qui permet de s'adapter à la charge*), la solution à long terme est de poursuivre la discrétisation illustrée dans les différents travaux précités en poussant le concept d'un convertisseur statique par cellule PV. L'énergie mise en jeu se réduit alors à l'ordre du volt et la sécurisation du générateur est extrême. Ce concept proposé au CNRS et validé par deux actions spécifiques est en cours de développement avec plusieurs autres laboratoires de recherche. Il rejoint la thématique développée au chapitre 4 de ce manuscrit.

Faire appel à des micro-convertisseurs de puissance équivalente à quelques cellules PV et qui pourraient ainsi se connecter au plus près de la source d'énergie PV a cependant fait l'objet d'études préliminaires dont les résultats obtenus en 1998 nous ont encouragés dans cette voie qui devrait permettre, a priori, de réduire les coûts. En effet, la conception des convertisseurs DC-DC élévateurs permettant d'atteindre en sortie des tensions de 60V en ayant une tension d'entrée inférieure à 3,5V a fait l'objet d'une publication.

La partie commande de ce type de convertisseur était intégrée et réalisée avec la même technologie que la partie puissance (*composants actifs*). Deux technologies ont été testées, les technologies CMOS 1,2 μ m puis 0,7 μ m. Sur cette expérience, nous souhaitons orienter nos travaux vers la conception et la réalisation de micro-convertisseurs entièrement intégrés. Pour cela, les recherches à poursuivre portent sur :

- La poursuite des études sur la conception d'inductances intégrées.
- La recherche d'une technologie plus adaptée à la puissance pour augmenter les puissances délivrées par ces micro-convertisseurs.
- La recherche du meilleur compromis entre la tension délivrée en sortie de ces convertisseurs et leur rendement.
- La recherche de solutions permettant de bien séparer la partie puissance de la partie commande cohabitant sur le même support. En effet, ceci pose problème à l'heure actuelle notamment sur l'estimation de la durée de vie de tels convertisseurs soumis à des contraintes thermiques importantes.

Il est à noter que ces travaux essentiellement orientés sur des sources PV peuvent avoir des retombées sur d'autres formes de sources qui sont elles-mêmes par nature discrétisables comme les batteries et les PAC.

Chapitre 3

Caractérisation et évolution des systèmes énergétiques de conversion.

III.1 Introduction. Position du sujet.

Les diverses études menées au sein du laboratoire depuis 1997 sur la conversion d'énergie PV ont pu être validées au fur et à mesure sur le site de démonstration mis en place à partir de 1998. Ce site de démonstration, tout d'abord dédié à la validation des chaînes élémentaires d'une centaine de watts, a évolué suivant les différentes études pour offrir aujourd'hui un site instrumenté et protégé, accessible uniquement aux personnes effectuant des mesures.



Figure 3.1. Vue d'ensemble du site d'étude situé sur un des toits terrasse du LAAS-CNRS.

La capacité de ce site est de 1kW crête de panneaux PV. Elle peut évoluer et se diversifier à d'autres sources d'énergies comme l'éolien, en fonction des études à mener, pour atteindre les 10kW. L'interconnexion électrique des panneaux, les charges et les appareillages de mesures sont en site protégé dans une salle de manipulation à proximité de ce site. Ainsi, les utilisateurs peuvent aisément effectuer des campagnes de mesures.

A travers les diverses mesures, nous avons pu faire progresser les connaissances sur le gisement solaire propre à ce site. Ainsi, comme d'une part Toulouse présente souvent des ensoleillements diffus avec une couverture nuageuse importante et que, d'autre part, l'exposition du site est soumise à des vents relativement importants, la production d'énergie PV est influencée et présente des profils très aléatoires.

Ce site nous a également permis de diversifier nos études sur la conversion d'énergie et de s'apercevoir rapidement qu'une source d'énergie photovoltaïque présente un comportement trop aléatoire pour pouvoir être exploitée seule. L'énergie naturellement complémentaire au PV et qui pouvait en partie compléter les défaillances de la source PV est l'énergie éolienne. En effet, les profils de vents augmentent la nuit et pourraient ainsi compenser le non fonctionnement du système PV.

Le lancement de ces nouvelles études a fait l'objet d'études préliminaires sur le dimensionnement du couplage et a abouti à une éolienne de 800W, qui est en cours d'installation sur le site. Le couplage s'effectuant par le biais de batteries, le site est également doté d'une vingtaine de batteries de 6V de 82A/heures chacune. Ce chapitre présente les performances du site de démonstration et du banc de mesures associé, les premières études effectuées sur le couplage entre l'énergie PV et l'énergie éolienne et le stockage.

III.2 Développement d'un site de démonstration.

III.2.1. Historique.

A partir de 1998, nous avons développé notre propre site expérimental sur un des toits du laboratoire afin de :

- valider expérimentalement les différents résultats obtenus au sein du LAAS-CNRS sur la conversion d'énergie électrique,
- approfondir la connaissance du comportement de la source solaire sur des échelles de temps très courtes (*de quelques secondes à quelques minutes*) et en diverses conditions réelles de fonctionnement.

Ce dernier point est nécessaire pour compléter les données issues d'atlas de gisements énergétiques solaires ou bien de centres météorologiques non adaptées à des études à l'échelle de la fréquence de commutation du convertisseur. Ce travail permet notamment de compléter les connaissances sur les changements brusques de comportement de la source énergétique. La chaîne de mesures a, quant à elle, été conçue pour pouvoir tester plusieurs types d'architectures de conversion, alimentées par différents types de sources énergétiques. Ce site expérimental permet d'évaluer divers convertisseurs statiques dédiés à ce type d'énergie sous forme de prototype ou issus du commerce, dans des conditions de fonctionnement réelles.

Les études liées au site de démonstration PV ont été supportées, de 1998 à nos jours, par le programme CNRS/ECODEV-ADEME puis l'Action Concertée «Energie» du CNRS. Initialement, ils ont bénéficié de subventions du Conseil Régional Midi-Pyrénées (*contrat région RECH 97001945, 1998*) pour l'achat des panneaux PV et de leur infrastructure. Le contrat COSEPE, obtenu dans le cadre de la Communauté de Travail des Pyrénées (*CTP*) en 2000 [III-1, III-2] et les contrats issus des programmes CNRS/ECODEV-ADEME à partir de 2000 nous ont permis de développer le banc de mesures automatisé et de diversifier les études sur le couplage du générateur PV à une source d'énergie éolienne, à travers des batteries de stockage. Enfin, des études contractuelles sous la responsabilité d'EDF ont débuté en 2001 et se poursuivent actuellement à travers un contrat CIFRE.

III.2.2. Cahier des charges.

III.2.2.1. Considérations générales.

Les diverses études sur l'optimisation de chaînes de conversion PV de moyennes et fortes puissances [III-1, III-2] montrent que plus la chaîne de conversion est discrétisée, plus on augmente la fiabilité globale du générateur tout en augmentant la puissance qu'il peut théoriquement produire.

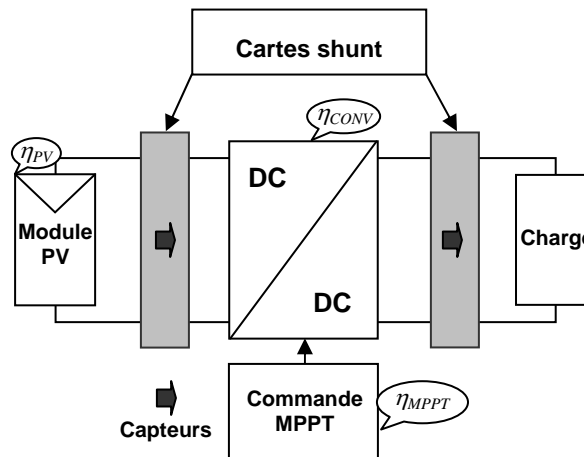


Figure 3.2. Répartition des différents rendements d'une chaîne de conversion PV.

Il restait à valider expérimentalement ce concept par la création d'un site d'étude sur la conversion d'énergie PV, permettant des études en grandeur réelle. Pour cela, nous avons conçu :

- **Un câblage électrique** permettant l'interconnexion électrique entre les divers panneaux PV et leur modification à souhait, à travers un tableau de connexions situé dans la salle de manipulation à proximité du site.
- **Une infrastructure suffisamment modulable pour supporter 12 panneaux PV.** L'orientation des panneaux est rendue possible suivant l'axe horizontal, afin d'assurer une meilleure orientation de ces derniers en fonction de la saison.
- **Un site de mesure,** pouvant servir à des études scientifiques sur des réalisations internes au LAAS, mais aussi, de tester à travers d'autres contrats et collaborations des réalisations d'autres universités ou même déjà commercialisées.

Le choix du site au LAAS-CNRS a entraîné des problèmes d'infrastructures. En effet, le site devait permettre un ensoleillement maximum et se devait d'être protégé et non accessible à tous, en raison du prix des panneaux PV et de leur fragilité. Nous avons donc choisi de placer le générateur PV, ainsi que tout son appareillage, sur un des toits terrasse du laboratoire, dont l'accès est limité aux personnes effectuant des mesures et des recherches sur le site. Cependant, le site a influencé l'architecture de l'infrastructure pour éviter au maximum de poser des problèmes d'étanchéité du toit.

Pour pouvoir effectuer des essais sur des puissances significatives, nous nous sommes dotés de 12 modules PV, commercialisés par BPSolarex sous la référence BP585 [III-3]. Chaque panneau PV possède comme caractéristiques, garanties à 10 % près :

- $P_{MAX} = 85W_{crête}$ pour $G = 1000 W/m^2$ et $T_{AMB} = 25^{\circ}C$,
- $V_{OPT} = 17,7V$ et $I_{OPT} = 4,8 A$,
- $V_{OC} = 22 V$ et $I_{SC} = 5 A$,
- $\eta_{PV} = 17 \%$.

Le rendement électrique η_{PV} est souvent donné par les constructeurs dans les conditions atmosphériques terrestres optimales ($T_{AMB} = 25^{\circ}C$, $G = 1400 W/m^2$).

III.2.2.2. Systèmes de puissance pouvant être testés.

La chaîne de mesures doit permettre d'évaluer jusqu'à douze systèmes de conversion d'énergie travaillant en même temps. Conçue pour pouvoir étudier une chaîne de conversion électrique modulable de 100W à 10kW, elle peut être constituée de modules énergétiques de 50 à 800W. Pour cela, chaque source élémentaire peut être constituée de un ou plusieurs panneaux PV du commerce mais aussi d'autres de sources comme des éoliennes ou encore des piles à combustible.

Prenons l'exemple d'une source élémentaire constituée d'un panneau BP585. la source modulaire peut atteindre 1020Watts. La chaîne électrique de conversion proprement dite est alors composée de 12 convertisseurs statiques, comportant chacun leur propre générateur d'énergie. Pour chacun des douze systèmes, le convertisseur DC/DC ou DC/AC élémentaire à tester peut être muni de son propre système de contrôle, par exemple une MPPT associée à diverses sécurités comme la détection de surcharges, de courts-circuits ou de circuits ouverts. Il peut soit fonctionner sur une charge autonome de type batterie, soit être associé avec d'autres convertisseurs.

III.2.2.3. Grandeurs mesurées et conditions de mesures [III-4].

La chaîne de mesure permet d'évaluer jusqu'à douze systèmes de conversion d'énergie simultanément. Chaque chaîne de conversion élémentaire soumise à des mesures peut comporter son propre générateur d'énergie, un convertisseur de puissance compatible et une commande adaptée. Dans le cas de sources PV, le système de mesure permet de mesurer simultanément et indépendamment pour chaque chaîne élémentaire :

- La tension et le courant aux bornes du générateur PV (V_{PV} , I_{PV}),
- La tension et le courant en sortie du convertisseur élémentaire DC/DC (V_{OUT} , I_{OUT}).

Pour chaque convertisseur élémentaire, toute mesure de tension ou de courant doit présenter une précision supérieure à 0,25%. En effet, les puissances électriques instantanées ainsi que les rendements, dépendant de ces mesures, doivent présenter une erreur inférieure à 1% pour être significatifs. Etant donnée la nature très aléatoire et non-linéaire des sources d'énergie renouvelables, les changements brutaux sont fréquents. De plus, la présence d'une commande extrême entraîne des oscillations permanentes d'une centaine de Hertz, qui ne permettent pas d'effectuer l'hypothèse de changement lent des caractéristiques électriques du convertisseur élémentaire. De ce fait, les mesures de tension et de courant pour chaque module (V_{PV} , I_{PV} , V_{OUT} , I_{OUT}) doivent être effectuées en simultané réel, pour obtenir une évaluation de la puissance électrique instantanée restant dans la marge de 1%. Il faut donc s'acheminer vers un système de mesures permettant de faire une acquisition simultanée de quatre mesures à un instant t donné. Seules des cartes de mesures à acquisition analogique peuvent assurer cette deuxième condition sur les mesures à effectuer.

Ces raisons ont donc écarté la plupart des cartes d'acquisition du commerce. En effet, il est à remarquer que la plupart des cartes d'acquisition du commerce effectuent en réalité des mesures séquentielles espacées de quelques microsecondes chacune, en supposant que le système varie très lentement par rapport aux mesures. Ce type de cartes ne pouvant pas être utilisé dans notre cas, nous avons élaboré nos propres cartes de mesures.

De plus, pour poursuivre la minimisation des erreurs commises, les acquisitions des grandeurs caractéristiques (*courants et tensions de chaque convertisseur*) se font simultanément et sur déclenchement automatique piloté par l'ordinateur. Ainsi, l'utilisateur n'a plus qu'à commander le début d'une série de mesures. Les résultats des différentes acquisitions sont acheminés par un bus numérique et stockés par fichier référencé en date et heure sur ordinateur.

Pour pouvoir traiter et comparer les données expérimentales recueillies sur plusieurs heures et éventuellement sur plusieurs jours par rapport aux données météorologiques, nous avons en plus, prévu de mesurer sur le site expérimental :

- L'irradiation solaire G moyen en surface,
- La température arrière d'un panneau sur un seul générateur PV, T_{ARR} ,
- La température ambiante, T_{AMB} ,
- La vitesse du vent, C_V .

Pour toute mesure, il est nécessaire d'utiliser un certain nombre de capteurs spécifiques qui génèrent parfois des pertes supplémentaires. Pour pouvoir effectuer diverses comparaisons, nous introduisons les notions de rendement η_{GLOB} et η_{TOTAL} , définies au chapitre 1. Des diverses mesures, nous pouvons déduire les différentes puissances suivantes :

- La puissance instantanée à l'entrée du convertisseur DC/DC, notée $P_{PV} = V_{PV} \cdot I_{PV}$,
- La puissance maximale délivrée par le générateur PV, notée $P_{MAXI} = V_{OPT} \cdot I_{OPT}$,
- La puissance instantanée à la sortie du convertisseur DC/DC, notée $P_{OUT} = V_{OUT} \cdot I_{OUT}$,
- Diverses puissances moyennes à l'entrée et à la sortie du convertisseur DC/DC.

Une des exploitations possible des données consiste à calculer les rendements suivants :

- Le rendement électrique instantané du convertisseur η_{CONV} ,
- Divers rendements moyens $\langle \eta_{CONV} \rangle$ sur diverses périodes,
- Les rendements liés à la commande en instantané η_{MPPT} ou moyen $\langle \eta_{MPPT} \rangle$,
- Le rendement global de la chaîne de conversion η_{GLOB} .

III.2.2.4. Choix de la fréquence d'échantillonnage.

Les précisions des mesures à effectuer ont été calculé sur la base de relevés expérimentaux typiques des grandeurs électriques, recueillies sur les convertisseurs DC-DC associés à des MPPT analogique créés et élaborés au LAAS-CNRS.

La fréquence des oscillations liée à la commande MPPT notée f_{MPPT} est inférieure à 60Hz (*période d'oscillation : 18ms*). Étant données les constantes de temps du générateur PV liées aux cellules PV mais aussi aux condensateurs de filtrage, f_{MPPT} est a priori toujours inférieure à 100Hz. Pour respecter le théorème de Shannon et bien restituer l'allure temporelle du signal pour divers types de sources d'énergie, la fréquence d'échantillonnage des mesures peut varier 0,1kHz à 10kHz. Pour le cas de sources d'énergie PV, nous fixons la fréquence d'échantillonnage des mesures à 1kHz (*au moins 10 échantillons par période d'oscillations de la MPPT*).

III.2.3. Principe d'acquisition des mesures [III-4].

III.2.3.1. Choix du type d'acquisition et de transfert des données.

Plusieurs types d'acquisitions de données existent. Une solution analogique nécessitant l'utilisation d'une carte d'acquisition rapide à entrée analogique a été retenue. Il est à noter que la vitesse d'acquisition de la carte est déterminée en fonction du taux d'erreurs que l'on peut accepter. Une solution numérique a été adoptée pour effectuer le transfert des mesures. Comme la sortie des capteurs de mesures est analogique, cela implique l'utilisation de convertisseurs analogique-numérique (CAN) pour transformer les données analogiques en numériques, une fois acquises. Étant données les contraintes spécifiques à nos mesures (*grande précision de chaque mesure et simultanéité des mesures pour chaque convertisseur statique testé*), 12 cartes de mesures spécifiques ont été créées. Elles permettent d'effectuer sur chaque carte, l'acquisition simultanée de 4 mesures en analogique, de faire la conversion en numérique des différentes mesures, et d'assurer le transfert des données, le tout obéissant aux ordres donnés par le PC.

Chaque banc de mesure comporte, en plus d'une carte de mesure, une carte d'adaptation que nous nommons par la suite carte shunt. Elle a pour rôle de recevoir les tensions et les courants à mesurer et de les adapter pour être compatible avec les entrées de la carte de mesure. Nous avons volontairement séparé les deux fonctions pour que les cartes de mesures restent génériques en fonction des études faites sur la chaîne de mesures. Un bus numérique achemine ensuite les données transformées par la carte de mesure vers le PC. Ce dernier muni d'une carte d'acquisition numérique du commerce ayant son propre logiciel d'acquisition est l'organe de traitement et de stockage des données.

III.2.3.2. Traitement des données et exploitation des résultats.

Depuis le milieu des années 80, le micro-ordinateur s'est peu à peu révélé être la plate-forme idéale pour les chaînes d'acquisition de données (*DAQ pour Data Acquisition System*). Cependant, l'insertion d'un PC au cœur des systèmes de mesure nous a obligé à utiliser différents moyens, afin de rapatrier les mesures. Nous avons utilisé notamment le logiciel LABWINDOWS/CVI, sous un environnement intégré ANSI C, conçu pour créer des applications de mesure virtuelle [III-5]. Typiquement, nous avons mis en œuvre une application communicante entre différents matériels de manière à prendre des mesures, les acheminer, les traiter, les stocker et les analyser puis présenter les résultats finaux.

Pour le logiciel de mesures, chaque mesure est une valeur numérique sur 16 bits. Seule la calibration lui permet de la transformer en une grandeur physique. On a utilisé pour cela une calibration linéaire de type :

$$X_{calib} = \frac{a \times X_{adc}}{2^N - 1} + b \quad (3.1)$$

Dans laquelle X_{calib} représente la valeur physique à mesurer, X_{adc} la valeur numérique de la mesure, N le nombre de bits sur laquelle elle est codée, a et b des constantes. Pour réaliser la calibration des cartes de mesures, nous utilisons une alimentation 35V, 10A (*CPX 200 Power Flex PSV*) de chez TTI et le multimètre Keithley modèle 2000 calibré le 31/10/2001 en accord avec le National Institute of Standard and Technology (*NIST*) comme référence de tension. Ces appareils de mesures ont une erreur négligeable par rapport aux autres sources d'erreurs de mesures. La calibration est faite à partir des données mesurées simultanément par le PC et le multimètre. Les résultats obtenus montrent que la relation entre ces mesures est bien linéaire (*Figure 3.3*).

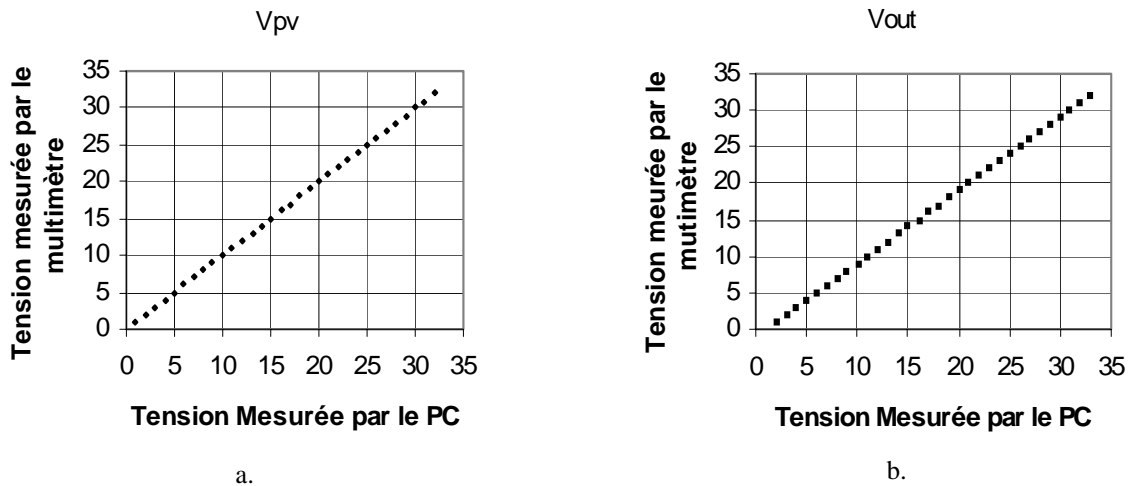


Figure 3.3. Relation entre la tension mesurée par le PC et la tension mesurée par le multimètre pour :
 a. la tension du panneau PV – b. la tension de sortie du convertisseur (*tension de la batterie*).

La calibration doit systématiquement être faite pour chaque carte de mesure. À partir des mesures et des caractéristiques techniques du voltmètre, nous avons calculé l’incertitude et l’erreur relative de mesure des tensions V_{PV} et V_{OUT} (Tableau 3.1).

Grandeurs	Valeur	Incertitude	Erreur relative
V_{PV}	34V	± 15 mV	$\pm 0,044$ %
V_{OUT}	34V	± 15 mV	$\pm 0,044$ %

Tableau 3.1 : Incertitudes et erreurs relatives de mesure des tensions V_{PV} et V_{OUT} .

Pour calibrer les mesures du courant de panneau PV et du courant en sortie du convertisseur, nous avons procédé de façon identique (figure 3.4).

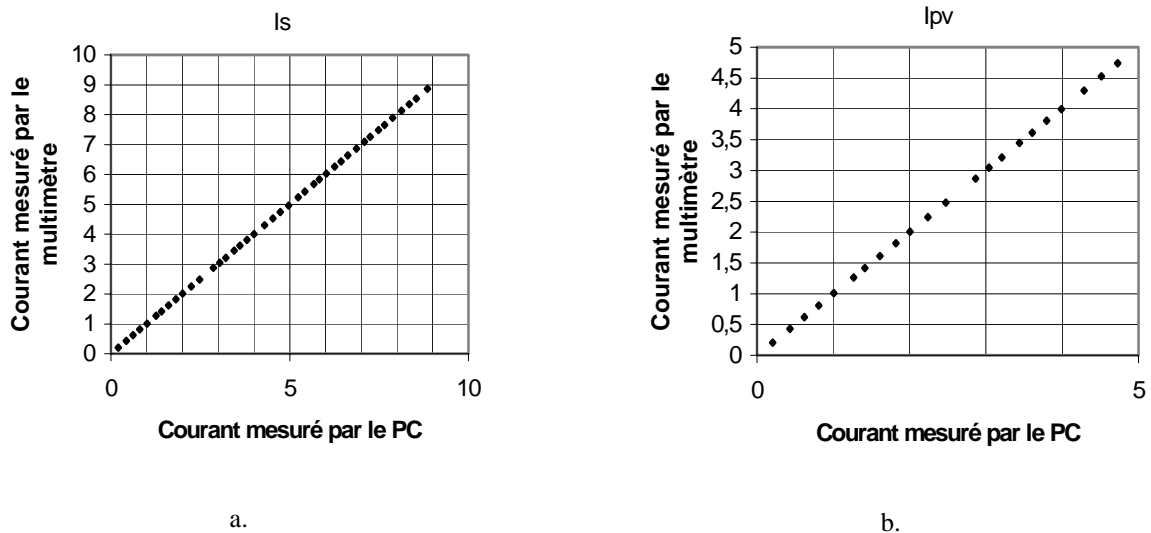


Figure 3.4. Relation entre la tension mesurée par le PC et celle par le multimètre pour :
 a. Le courant du panneau PV – b. Le courant en sortie (*Courant de la batterie*).

L’incertitude et l’erreur relative de mesure des courants I_{PV} et I_{OUT} sont consignées dans le tableau 3.2. Le tableau 3.3 résume l’incertitude et l’erreur relative de mesure des puissances P_{PV} et P_{OUT} et du rendement.

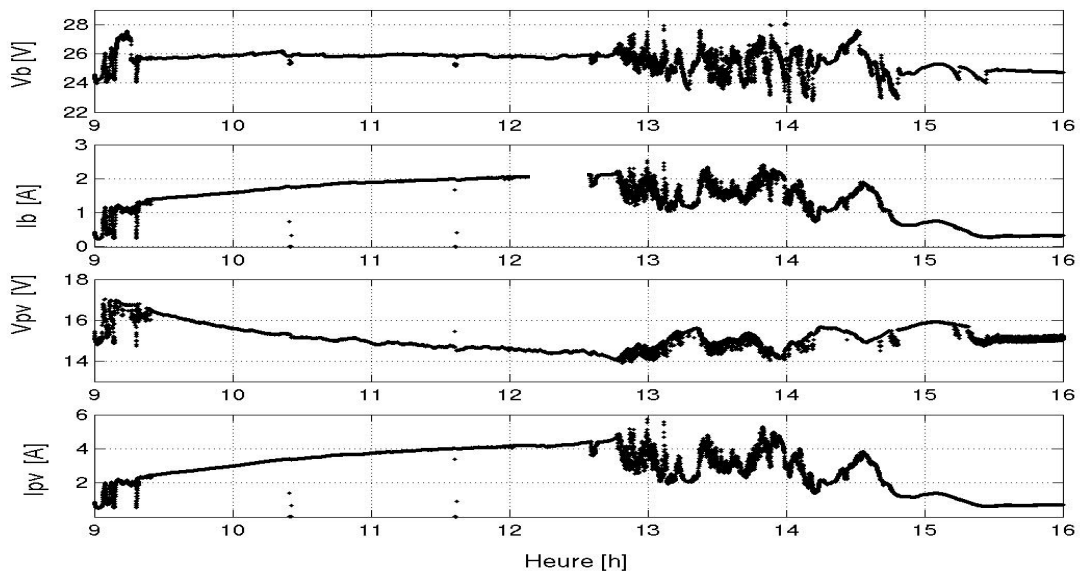
(Suite p. 53)

Grandeurs	Valeur	Incertitude	Erreur relative
I_{PV}	3 A	$\pm 7,44$ mA	$\pm 0,248$ %
I_{OUT}	3 A	$\pm 7,53$ mA	$\pm 0,251$ %

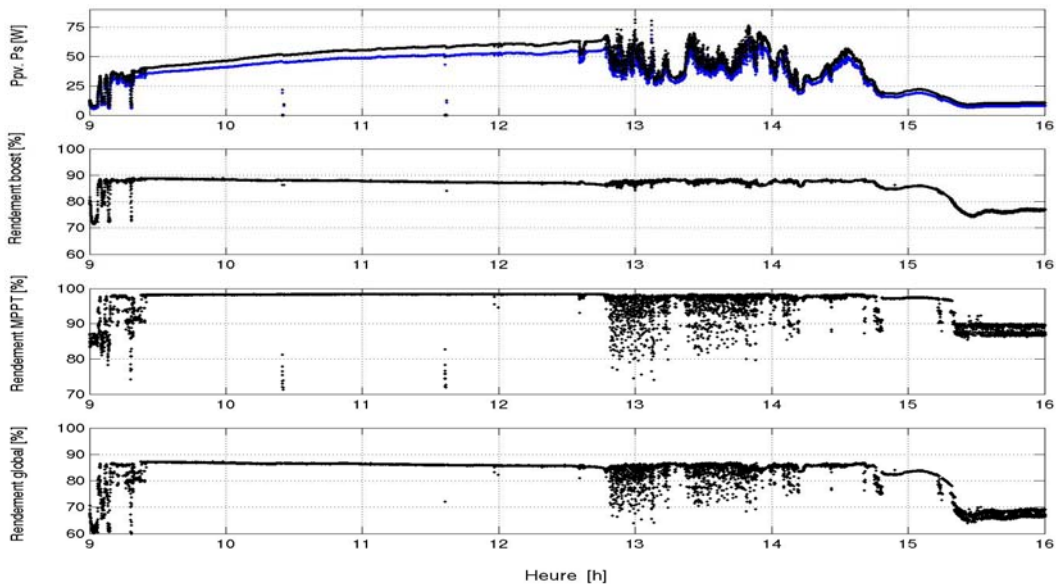
Tableau 3.2 : Incertitudes et erreurs relatives de mesure des courants I_{PV} et I_{OUT} .

Grandeurs	Valeur	Incertitude	Erreur relative
P_{PV}	102 W	$\pm 0,298$ W	$\pm 0,29$ %
P_{OUT}	102 W	$\pm 0,301$ W	$\pm 0,29$ %
Rendement	100 %	$\pm 0,59$ %	

Tableau 3.3 : Incertitudes et erreurs relatives de mesures de puissances P_{PV} et P_{OUT} et de rendement.



a.



b.

Figure 3.5. Exemple de résultats expérimentaux relevés sur un convertisseur élévateur (*Boost*) avec commande IMPPT débitant sur une batterie de 24V sur une journée (*Temps variable et changement brusque d'éclairément à partir de 12h40*).

Chaque point tracé sur les relevés expérimentaux de la figure 3.5 correspond à la moyenne de 1000 mesures (ou encore 1000 échantillons). La puissance disponible aux bornes du panneau PV (P_{PV}) s'obtient en multipliant les valeurs instantanées du courant I_{PV} et de la tension V_{PV} du panneau. La moyenne de 1000 mesures est ensuite calculée à l'aide d'une fonction MATLAB.

On effectue de même pour obtenir la puissance aux bornes de la charge (batterie) P_{OUT} , en multipliant les valeurs instantanées du courant I_{OUT} et de la tension V_{OUT} de la charge. On finit par effectuer la moyenne des 1000 mesures. En divisant la puissance moyenne disponible aux bornes de la batterie par la puissance moyenne aux bornes du panneau PV, on obtient le rendement du convertisseur, η_{CONV} . Le rendement de la commande MPPT η_{MPPT} est obtenu par la division de la puissance moyenne aux bornes du panneau PV par la valeur maximale de puissance du même bloc de mesures.

Finalement, le rendement global η_{GLOB} de la chaîne de conversion d'énergie PV est obtenu par la multiplication des rendements η_{CONV} et η_{MPPT} . Les figures 3.5 et 3.6 sont des exemples de relevés sur une journée pouvant être effectués avec le banc de mesures sur une chaîne de conversion élémentaire.

Le banc de mesures est équipé pour pouvoir tester jusqu'à 4 convertisseurs du commerce. Ces derniers sont considérés par le système d'acquisition comme des boîtes noires, car il est souvent difficile de connaître la qualité des mesures faites. Parfois, l'information n'existe même pas. Nous avons donc conçu des cartes supplémentaires dites «cartes shunt», indépendantes de chaque système à tester et permettant d'effectuer des tests comparatifs entre les convertisseurs dans des conditions d'utilisation les plus proches possibles.

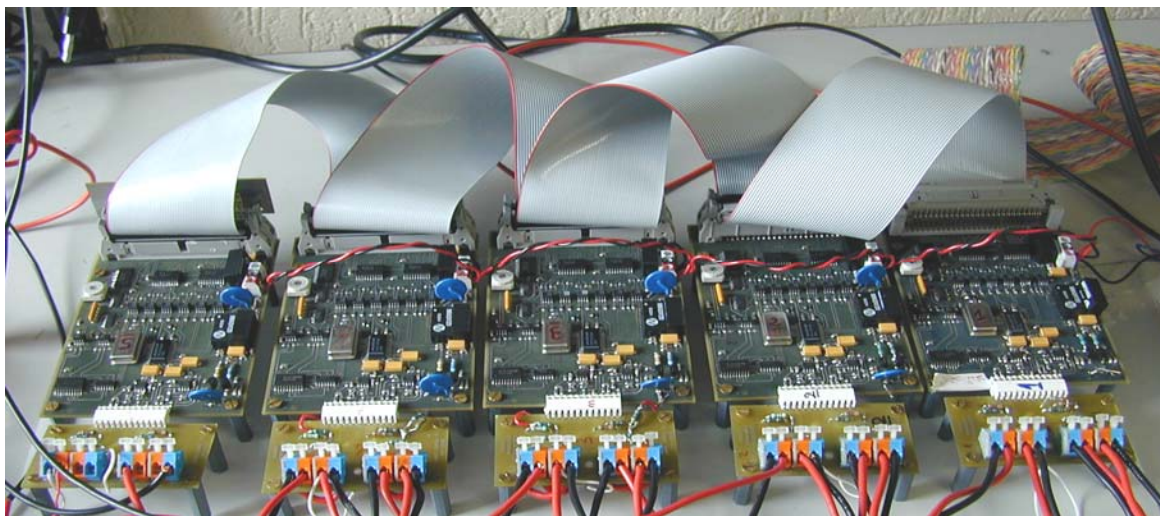
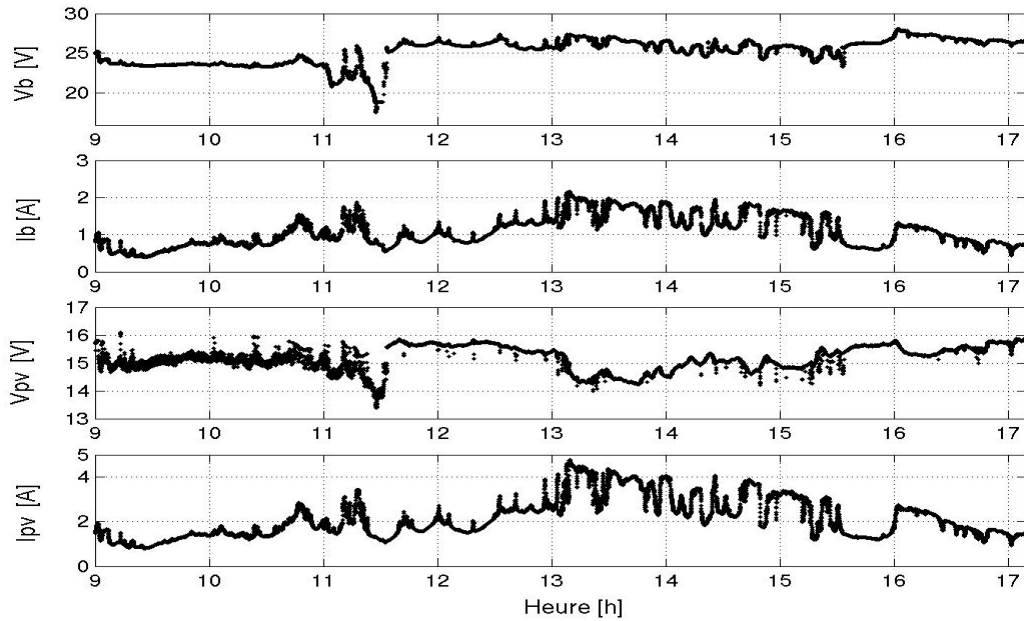
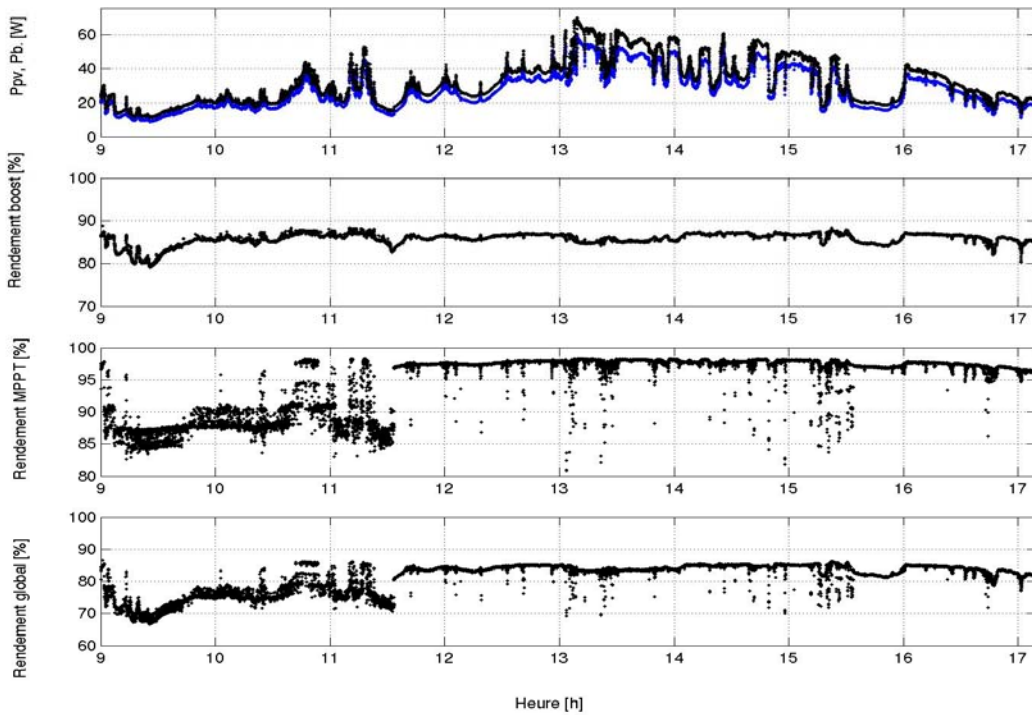


Figure 3.7. Système d'acquisition pouvant comparer les performances de 4 convertisseurs du commerce.

Le système d'acquisition est présenté en figure 3.7 avec 5 bancs de mesures, dotés chacun d'une carte shunt auparavant calibrée et d'une carte de mesure. On peut ainsi tester simultanément et dans les mêmes conditions d'éclairage, de température, de source et de charge, différentes chaînes de conversion. Cette chaîne d'acquisition permet d'effectuer directement des tests comparatifs de différentes réalisations et d'équipes de recherche développés au sein des collaborations ou bien même des produits du commerce.



a.



b.

Figure 3.6. Autre exemple de résultats expérimentaux sur un convertisseur élévateur (*Boost*) avec la commande IMPPT, débitant sur une batterie de 24V avec changement brusque d'éclairement sur toute une journée.

Les panneaux PV disponibles au LAAS ont la même référence (*BP585*) et ont subi le même vieillissement (*Installation à la même date*). Par ailleurs, le constructeur s'engage sur une dispersion maximale de 10% des caractéristiques sur 10 ans. Il est donc raisonnable de supposer que les panneaux ont des caractéristiques presque identiques. Pour vérifier ceci, les caractéristiques $I(V)$ de chaque panneau sous différents éclaircements sont relevées régulièrement. On peut ainsi effectuer un étalonnage des panneaux avant et pendant une campagne de test et éventuellement en corriger les dispersions de caractéristiques pour pouvoir garantir des conditions de mesures et de tests les plus homogènes possibles.

Pour réaliser les essais dans des conditions de test similaires, il conviendrait d’avoir des batteries identiques placées dans un même état initial de charge, ayant subies le même vieillissement et ayant le même comportement en tension lorsqu’elles sont en charge sous un courant donné. Ces conditions semblent difficiles à réaliser en particulier dans le cas de batteries. En effet, étant donnée la grande dispersion des caractéristiques des batteries selon les cycles d’utilisation déjà effectués, cette hypothèse ne peut pas être retenue. Pour ce type de charges, nous effectuons donc les tests comparatifs en connectant la sortie de tous les convertisseurs sur une même batterie ou sur plusieurs batteries connectées en parallèle. Pour éviter que ces batteries ne subissent un taux de charge important, notamment lors de campagnes de tests sur plusieurs jours, une charge programmable est placée en parallèle permettant, si c’est nécessaire, d’effectuer des décharges. Ce degré de liberté nous permet en plus de tester sur notre site de démonstration différents profils de charge correspondant à différents scénarios sans avoir de charge réelle.

III.2.3.3. Exemple de comparaison entre différents chargeurs de batterie [III-6].

Dans le cadre d’études contractuelles avec EDF, des chargeurs de batterie ont été testés sur le site expérimental. Ils ont été testés dans des conditions similaires en comparaison du chargeur développé au LAAS-CNRS.

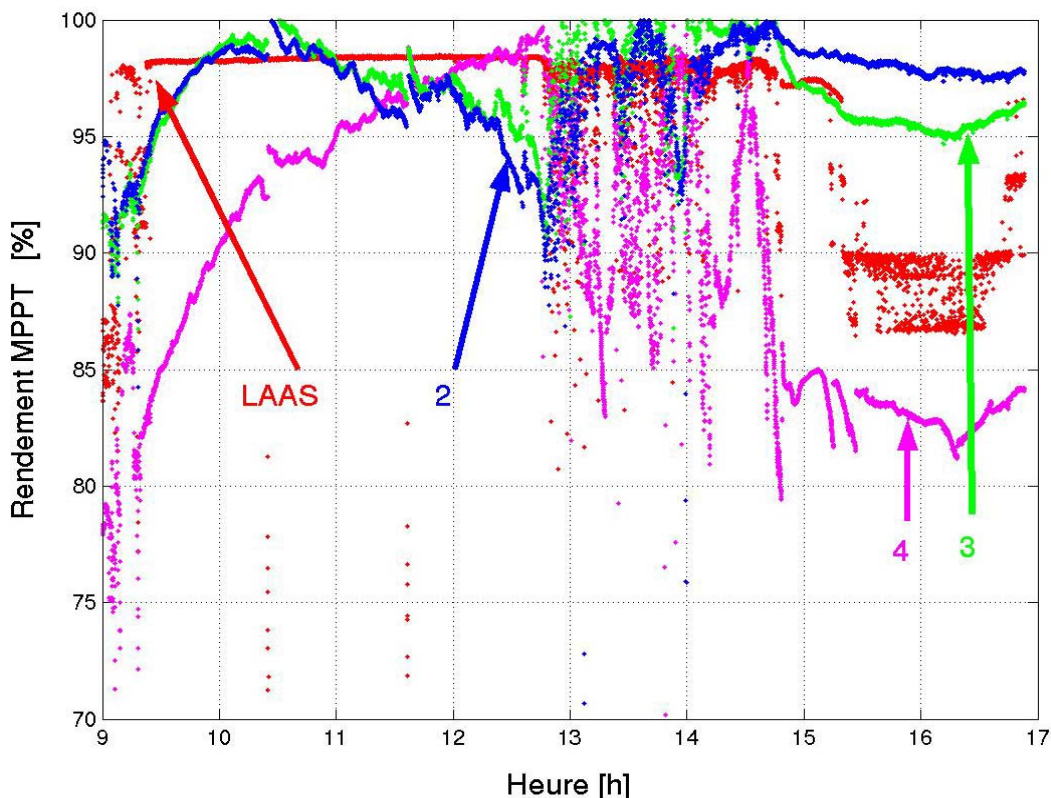


Figure 3.8. Comparaison des performances de 4 chargeurs de batterie différents [III-6].

Les chargeurs 2 et 3 sont « abaisseurs » de tension avec une commande MPPT. Le chargeur 4 est en fait une connexion directe entre la source PV et la batterie via un interrupteur statique. Il est cependant doté d’un régulateur pour protéger la batterie. Tous les trois sont alimentés par 2 panneaux PV en série.

Le chargeur 1 a été conçu au LAAS. Il est élévateur de tension et est doté de la commande IMPPT. Il est alimenté par un seul panneau PV. Tous les chargeurs débitent sur une même batterie de 24V. Une charge active placée en parallèle sur la batterie permet de régler le courant de décharge afin de maintenir la tension de la batterie dans une plage de bon fonctionnement. La figure 3.8 et le tableau 3.4 présentent respectivement

un exemple de relevé expérimental sur une journée et les énergies acquises par les quatre chargeurs de batterie permettant d'effectuer des comparaisons directes sur ces différents chargeurs.

Chargeur	Énergie délivrée	Énergie disponible	$\frac{E_{délivrée}}{E_{disponible}} \%$
1 (LAAS)	1,1531 MJ (1 générateur PV)	1,1915 MJ	96,78 %
2	2,2818 MJ (2 générateurs PV)	2,3374 MJ	97,62 %
3	2,3540 MJ (2 générateurs PV)	2,4248 MJ	97,08 %
4	2,1776 MJ (2 générateurs PV)	2,4040 MJ	90,58 %

Tableau 3.4. Comparaison des énergies acquises par les quatre chargeurs de batterie.

Ce type d'étude est un exemple des capacités du banc de mesures. Par comparaison sur plusieurs journées, résultats significatifs, ce type de campagne de mesures doit être effectué sur plusieurs jours et sous des tensions de batterie différentes.

III.2.4. Synthèse et perspectives

Le banc de mesure présenté dans ce chapitre permet de déduire les divers rendements électriques et énergétiques d'une ou plusieurs chaînes de conversion, réalisées à partir de convertisseurs élémentaires. De plus, il permet d'effectuer des mesures en simultané sur différents chargeurs ou convertisseurs et d'analyser le comportement de ces derniers, en pouvant effectuer des comparaisons directes.

Il constitue donc aujourd'hui un outil original d'évaluation des convertisseurs présentant des potentialités très intéressantes, que nous pouvons mettre à la disposition de la communauté scientifique.

Pour que le banc de mesures soit totalement calibré, une série d'étalonnage est encore nécessaire, notamment pour qu'il soit compatible avec les normes européennes des mesures à effectuer. Ce banc de mesures continue à évoluer et nous sert régulièrement à tester :

- de nouvelles commandes MPPT,
- de nouveaux convertisseurs élémentaires DC/DC,
- de nouvelles associations de convertisseurs.

Il est actuellement la base de validation des travaux accomplis sur le couplage du PV avec d'autres sources d'énergies et sur le stockage.

III.3. Couplage avec l'énergie éolienne et stockage.

III.3.1. Problématique du couplage.

III.3.1.1. Contexte des travaux.

Les études sur le couplage entre le photovoltaïque et d'autres sources d'énergies ont débuté en 2000 à travers le projet «Méthodologie de Conception de Centrales Modulaires Photovoltaïques et Eoliennes», dans le cadre du programme CNRS/ECODEV ADEME [III-7]. Compte tenu de l'ampleur des études à mener et de la pluridisciplinarité des domaines de compétences concernés, deux laboratoires de recherche, le LEEI et le GREAH, se sont joints au LAAS-CNRS pour développer de nouvelles architectures de conversion permettant d'associer ces sources entre elles et de les utiliser au mieux de leurs possibilités. Le projet portait plus particulièrement sur les études des réseaux électriques autonomes de petites et moyennes puissances utilisant des sources d'énergie renouvelables. Dans ce cadre, deux types d'énergie (*le photovoltaïque et l'éolien*) ont fait l'objet d'études poussées concernant leur comportement lors du couplage rendu possible à travers des organes de stockage.

Ces travaux ont porté sur la conception et la réalisation de générateurs d'énergie en réseaux, allant d'un cahier des charges initial (*applications autonomes de 1 à 3kW*) jusqu'à des solutions d'architectures évolutives [III-8]. L'accent a été mis sur le caractère modulaire des diverses architectures de conversion proposées. Même si la cible visée en premier lieu concernait les réseaux électriques autonomes, le caractère générique de notre approche permet aujourd'hui de projeter les résultats obtenus vers des systèmes connectés à des réseaux centralisés.

Etant données les compétences en électrotechnique de chacun des partenaires en 2000, les diverses recherches sur ces énergies ont débuté sur le système complet de traitement de l'énergie (*production, stockage, conversion*). La partie conversion servant d'étage d'adaptation entre les différentes sources, les organes de stockages et les charges, a été au cœur des diverses études menées. Notre objectif était d'assurer une augmentation de la production d'énergie d'une chaîne de conversion donnée, tout en la rendant plus robuste et plus fiable dans la continuité des travaux développés jusqu'à présent. Ces études ont permis de généraliser les concepts de chaînes modulables développées spécifiquement pour le PV.

Les résultats de laboratoire obtenus à ce jour permettent d'ores et déjà d'envisager des réductions de coût par la création de chaînes optimales présentant des durées de vie plus importantes [III-8]. Pour cela, sur la base d'une méthodologie de modélisation permettant de concevoir de nouvelles chaînes de conversion modulaires en puissance, une modélisation comportementale de chaque élément du système complet a été développée. Le concept de modularité développé sur l'énergie photovoltaïque a dans ce cadre été étendu au domaine de l'énergie éolienne.

L'étude se poursuit actuellement sur l'interconnexion possible de chaque module de conversion, qu'elle que soit la source qui l'alimente. Cette méthodologie de conception est aujourd'hui en cours de validation à l'aide de prototypes de démonstration de faible puissance (*quelques kilo-watts*) sur le site expérimental du LAAS-CNRS. Ainsi, sur la base de l'expérience acquise par le LAAS-CNRS sur l'énergie photovoltaïque, nous avons poursuivi des études sur le gisement photovoltaïque en Midi-Pyrénées, la mise au point de plusieurs types d'architectures de conversion modulaires photovoltaïques et le développement de nouvelles lois MPPT optimisées. Après avoir fait un bref rappel sur le comportement de l'énergie éolienne, nous présentons dans la partie couplage l'état d'avancement des travaux menés en collaboration avec le LEEI. De nouveaux objectifs sont apparus au fur et à mesure des études menées.

- Lors du couplage à travers des batteries, il est apparu la nécessité d'approfondir des études sur l'organe même de stockage qui n'est pas adapté aux cycles agressifs de charges et de décharges profondes, occasionnés lors d'une production d'énergie renouvelable. Ces travaux nous ont amené à développer des recherches en collaboration avec le CIRIMAT, dont les points principaux sont rappelés dans la partie stockage de ce chapitre.
- La poursuite de la discrétisation de la chaîne de conversion à l'échelle de quelques cellules PV amène à franchir un nouveau pas dans l'évolution des systèmes de conversion et d'étudier la pertinence de l'intégration d'une partie de la chaîne de conversion au plus près de la source. Pour des raisons de clarté de rédaction, ces études ont été développées dans le chapitre 4 de ce mémoire.

III.3.1.2. Situation des travaux fin 2003.

Dans le contexte mondial (*enjeux économiques et énergétiques, associés récemment à un souci de respect de l'environnement*), beaucoup de prototypes de démonstration ont déjà montré la faisabilité et l'intérêt d'un couplage entre différentes sources d'énergies, dans le but de lisser la courbe de production d'énergie et la rendre moins aléatoire. Après un bref état de l'art sur ce type de systèmes, nous avons pris conscience de l'existence d'un marché de l'éolien ne se limitant pas aux fortes puissances pour des systèmes connectés aux réseaux centralisés. Par exemple, le marché des réseaux autonomes multi-sources (*éolien – PV, éolien - diesel,...*) est un des marchés mondiaux en très forte croissance. Cette croissance est notamment poussée par les pays en émergence ou les territoires à accès difficiles (*DOM TOM,...*) et déjà un grand nombre d'entreprises de taille variable visent cette cible.

Cependant, le contexte français présente encore des faiblesses importantes sur la partie industrialisation de tels produits. En effet, malgré des efforts importants des collectivités locales, le réseau de PME et PMI n'arrive pas à se développer dans des proportions correspondant à la demande. EDF, dans le cadre d'un projet pluri annuel sur l'intégration des énergies renouvelables au sein du bâtiment soutient le LAAS-CNRS (*pour le photovoltaïque*) et le LEEI (*pour l'éolien*) de façon indépendante, afin d'étudier :

- l'impact technico-économique de ces technologies, notamment les répercussions sur l'exploitation du réseau,
- les résultats des études menées par chaque équipe et comment certains pourraient être utilisés dans un contexte industriel,
- comment exploiter les avancées scientifiques du domaine et progresser vers des pré-industrialisations.

III.3.2. L'énergie éolienne.

III.3.2.1. Problématique.

Parmi les énergies renouvelables contribuant actuellement à la production d'électricité, l'énergie éolienne est celle qui présente le plus fort potentiel de développement à court terme. En France, les ressources éoliennes exploitables annuellement sont estimées à environ 70.10^9 kWh terrestres et 500.10^9 kWh en offshore, soit plus que la consommation intérieure annuelle d'électricité (*environ 400.10^9 kWh*) [III-9]. Comme le photovoltaïque, cette énergie est très fluctuante et ses variations sont difficilement prévisibles. Cela pose alors des problèmes de production analogues à ceux évoqués lors de l'étude de l'énergie PV.

Il existe deux grandes catégories d'éoliennes selon la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice :

- les turbines à axe horizontal,
- les turbines à axe vertical.

Sur le plan aérodynamique, on peut comparer les différents types de turbines en comparant leur coefficient aérodynamique de puissance C_p en fonction de la vitesse normalisée λ du vent (figure 3.9). Ces deux grandeurs sont définies dans le paragraphe suivant.

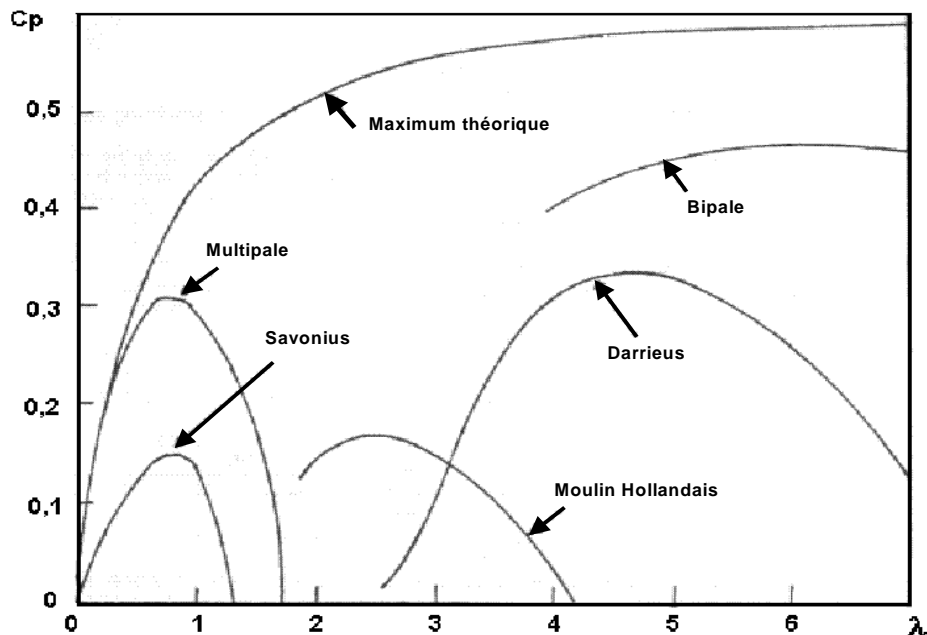


Figure 3.9. Caractéristiques $C_p(\lambda)$ de différents types d'éoliennes.

Pour chaque courbe $C_p(\lambda)$, on peut remarquer une vitesse normalisée optimale λ_{opt} correspondant au maximum de rendement aérodynamique. Les courbes $C_p(\lambda)$ sont plus plates pour les éoliennes à axes horizontaux par rapport à celles à axes verticaux ou multi-pales et sont donc moins sensibles aux variations de λ autour de λ_{opt} . De plus, concernant le coefficient de puissance, on peut noter un net avantage des éoliennes à axe horizontal pour la production de fortes puissances. Ce jugement est à nuancer lorsqu'il s'agit d'installer ces éoliennes dans des sites moins propices avec des profils de vent plus difficiles à exploiter (*zone urbaine*). Dans ces conditions, les mesures de l'énergie effectivement restituée montrent que les éoliennes à axe vertical peuvent mieux répondre à ce type de contrainte. Par contre, plus leur caractéristique $C_p(\lambda)$ sera en cloche, plus l'adaptation de la vitesse de rotation de l'éolienne par rapport à celle du vent sera nécessaire pour rester dans la zone optimale, et donc avoir un taux de production d'énergie non négligeable.

Une turbine éolienne est dimensionnée pour développer une puissance nominale P_n à partir d'une vitesse de vent nominale V_n . Pour des vitesses de vents supérieures à V_n , la turbine éolienne doit modifier ses paramètres aérodynamiques afin d'éviter les surcharges mécaniques et éviter que la puissance récupérée par la turbine ne dépasse pas la puissance nominale pour laquelle l'éolienne a été conçue. Pour cela, les grandeurs suivantes sont à prendre en compte lors du dimensionnement d'une éolienne :

- V_D , vitesse du vent à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de l'énergie,
- V_M , vitesse maximale de vent au-delà de laquelle l'éolienne doit être stoppée pour des raisons de sécurité.

III.3.2.2. Production d'énergie éolienne et conversion en électricité.

Comme nous avons pu voir dans le paragraphe précédent, les performances d'une éolienne sont caractérisées par un coefficient de puissance C_p représentant le coefficient aérodynamique de puissance

d'une turbine [III-10]. En fait, ce coefficient caractérise l'aptitude de l'aérogénérateur à capter l'énergie du vent. Il dépend de la puissance récupérée sur l'arbre de la génératrice P_a et de la puissance du vent P_{VENT} :

$$C_p = \frac{P_a}{P_{VENT}} \quad (3.2)$$

Cette puissance P_{VENT} caractérise l'énergie éolienne qui est formée de l'énergie cinétique de particules en mouvement contenues dans l'air traversant une surface S . Cette puissance est proportionnelle au cube de la vitesse du vent :

$$P_{VENT} = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot S \cdot V_{VENT}^3 \quad (3.3)$$

avec ρ représentant la masse volumique de l'air ($kg.m^{-3}$), S la surface traversée par le vent (m^2) et V_{VENT} , la vitesse du vent ($m.s^{-1}$). Le coefficient de puissance C_p dépend également de la vitesse réduite λ (figure 3.9) qui se caractérise par la relation suivante :

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega}{V_{VENT}} \quad (3.4)$$

avec R , représentant le rayon des hélices (m) et Ω la vitesse de rotation des pales ($rd.s^{-1}$).



Figure 3.10. Caractéristiques de l'éolienne de type Savonius modélisée.
 $R=0.5m, H=2m, S=2m^2$.

Compte tenu des études que nous menons en collaboration avec le LEEI sur le couplage de l'énergie photovoltaïque et de l'énergie éolienne à travers des générateurs de faibles puissances, le choix de l'éolienne à étudier s'est plus particulièrement porté sur une éolienne de très faible puissance ($< 1kW$), afin d'être compatible avec les moyens de caractérisation du site de démonstration du LAAS-CNRS. Dans ce cadre, le LEEI s'est intéressé au comportement d'une éolienne de type Savonius [III-12], Les caractéristiques mécaniques de cette éolienne sont données ci-dessous.

A partir de sa caractéristique $C_p(\lambda)$, un modèle sous SIMULINK a été créé pour simuler le comportement de l'éolienne. Le couple éolien est déterminé comme étant :

$$C_{éol} = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot (2 \cdot R \cdot H) \cdot \frac{V_{VENT}^3}{\Omega} \quad (3.5)$$

avec H représentant la hauteur de l'éolienne (m).

III.3.2.3. Présentation de la chaîne élémentaire de conversion éolienne.

La chaîne de conversion éolienne que nous avons étudié dans le cadre du contrat «Méthodologie de Conception de Centrales Modulaires Photovoltaïques et Eoliennes» réunissant le LEEI, le GREAH et le LAAS-CNRS, financé par le programme CNRS ECODEV/ADEME (2000-2002) et soutenu par le programme énergie en 2003, est présentée sur la figure 3.11. Elle est composée des éléments suivants :

- une éolienne pour convertir l'énergie du vent en énergie mécanique,
- une machine synchrone (MS) pour convertir l'énergie mécanique en énergie électrique,
- un redresseur doté d'une commande MPPT,
- un hacheur abaisseur de type Buck pour adapter la tension entre le bus continu et la batterie,
- une batterie.

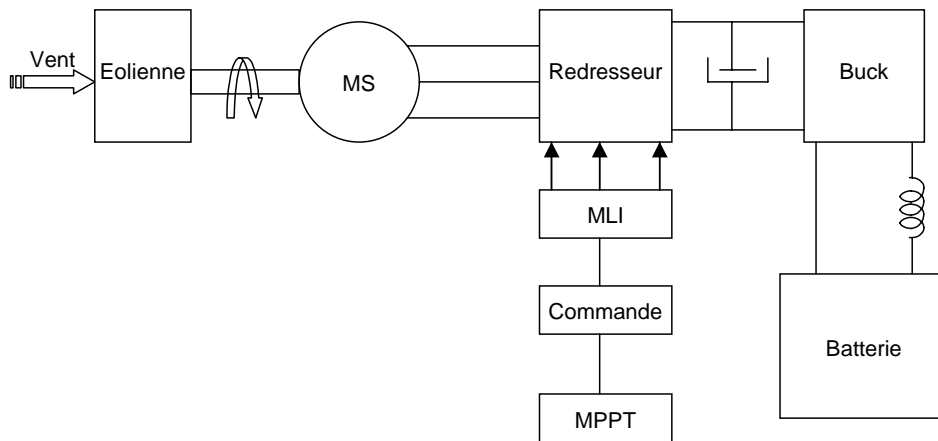


Figure 3.11. Chaîne de conversion éolienne élémentaire de très faible puissance (éolienne Savorius).

La machine synchrone à aimant est utilisée en tant que génératrice de l'éolienne. L'équation mécanique décrivant le comportement de l'éolienne utilise le principe fondamental de la dynamique. Soit :

$$C_{EM} = C_{EOLIEN} - F_{EOLIEN} \Omega_{ROT} - J_{EOLIEN} \frac{d\Omega_{ROT}}{dt} \quad (3.6)$$

avec C_{EOLIEN} représentant le couple sur l'arbre de l'éolienne (Nm), F_{EOLIEN} le coefficient de frottement de l'éolienne (Nm.rad⁻¹) et J_{EOLIEN} l'inertie de l'éolienne et de la machine synchrone (kg.m²).

L'architecture de la machine synchrone associée au redresseur est succinctement expliquée dans les références suivantes [III-10, III-11, III-12]. La modélisation de la totalité de cette chaîne et son implantation sous MATLAB/Simulink sont consignés dans le rapport [III-8]. La figure 3.12 décrit la mise en place de la commande du redresseur et de la machine synchrone. Une commande de type MPPT calcule une vitesse de référence $\Omega_{réf}$, qui est ensuite comparée à la vitesse de rotation mesurée Ω_{MES} . Le régulateur de vitesse détermine alors, grâce à l'erreur de vitesse ($\Omega_{réf} - \Omega_{MES}$), la consigne en couple $C_{EMréf}$ qui permet d'atteindre la vitesse $\Omega_{réf}$ calculée par la MPPT. Cette valeur de couple permet de calculer le courant de référence statorique $I_{SQréf}$, suivant l'axe q, à l'aide de la relation suivante :

$$I_{SQréf} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{C_{EMréf}}{P_p \cdot \Phi_{aimant}} \quad (3.7)$$

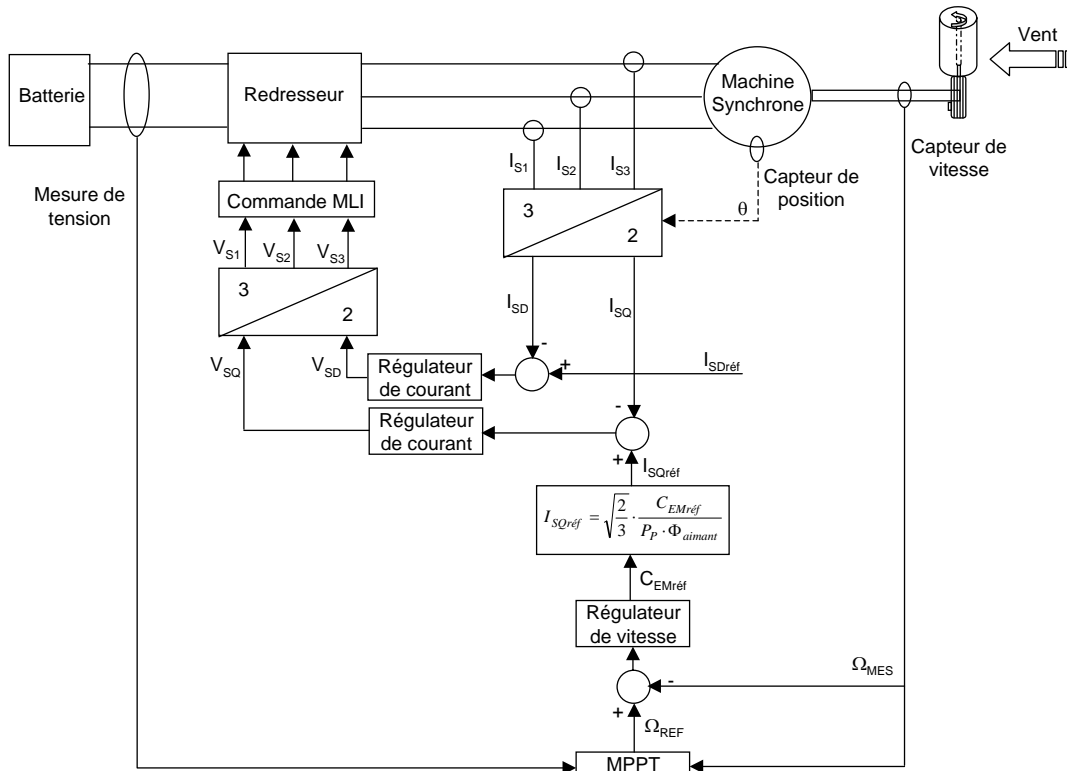


Figure 3.12. Synoptique de la commande du redresseur et de la machine synchrone.

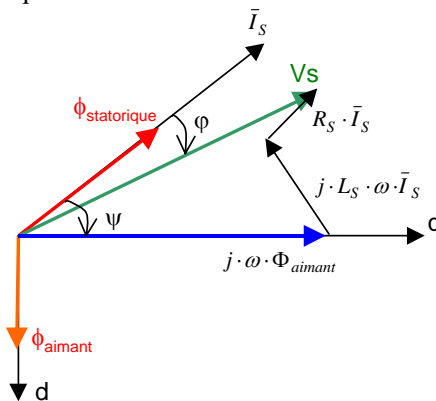


Figure 3.13. Représentation vectorielle des grandeurs électriques de la MS.

Souhaitant travailler à couple maximum afin de simplifier les calculs, on impose un courant statorique nul suivant l'axe d, tel que $I_{SDref} = 0$. En effet, le couple maximal est atteint lorsque I_S est en phase avec la f.e.m. à vide, comme indiqué sur la figure 3.13. On travaille donc avec un angle $\psi = 0$. I_S est alors colinéaire à l'axe q et I_{SD} doit être fixé à zéro [III-12].

A partir des courants de référence ainsi déterminés, les régulateurs de courant déterminent les tensions à imposer à la machine synchrone pour fonctionner à la vitesse optimale. Le calcul des régulateurs est consigné dans les références [III-11] et [III-12].

Dans la chaîne élémentaire de la figure 3.11, le redresseur triphasé permet d'imposer au moteur les tensions simples V_{in} nécessaires pour l'obtention de la vitesse de rotation désirée par la MPPT. La commande des interrupteurs du redresseur peut s'effectuer à l'aide d'une commande à Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) régulière symétrique de fréquence de découpage égale à 10 kHz. Cela peut être une MLI instantanée ou encore à valeur moyenne.

Le test du fonctionnement du système sans l'implantation de la MPPT et avec une tension de bus parfaite nous permet de tracer les caractéristiques $P(\Omega_{méca})$ (figure 3.14) pour plusieurs vitesses de vent. On constate qu'il existe pour chaque courbe un point de puissance optimale correspondant à une certaine vitesse de rotation. Etant données les caractéristiques de l'éolienne de faible puissance modélisée, une commande MPPT est prévue.

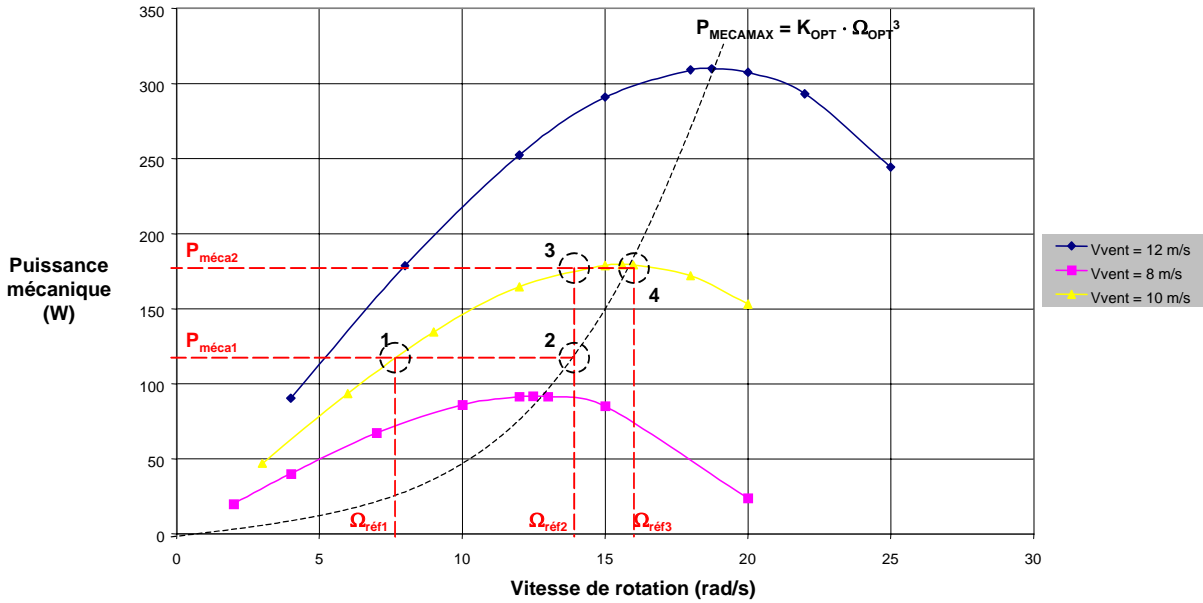


Figure 3.14. Caractéristiques $P_{méca}(\Omega_{méca})$ à différentes vitesses de vent V_{vent} .

Considérons maintenant le comportement d'une MPPT pour une chaîne de conversion d'énergie éolienne. La commande MPPT permet de se placer au point de puissance optimale, quelle que soit la vitesse de vent, en imposant une vitesse de rotation optimale au moteur. Nous utilisons pour cela la formule suivante :

$$P_{MECA} = K_{éol} \cdot \Omega_{REF}^3 \quad \text{avec} \quad K_{éol} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (2 \cdot R \cdot H) \cdot C_{P_{max}} \cdot \frac{R^3}{\lambda^3} \quad (3.8)$$

Le fonctionnement de la MPPT peut être brièvement expliqué sur la figure 3.14. Supposons pour cela que la vitesse du vent est de 10 m/s et qu'initialement, le système est au point 1 ($P_{méca1}, \Omega_{REF1}$). La MPPT calcule alors la vitesse de référence Ω_{REF2} à imposer au moteur correspondant à $P_{méca1}$. Le système se place alors au point 2 ($P_{méca1}, \Omega_{REF2}$). Une fois la vitesse de référence envoyée, le système va évoluer en $P_{méca2}$ et se retrouver au point 3 ($P_{méca2}, \Omega_{REF2}$). La MPPT calcule à nouveau la vitesse de référence Ω_{REF3} correspondant à $P_{méca2}$ et le système se place alors au point 4 ($P_{méca2}, \Omega_{REF3}$). Le système évolue donc vers le point de puissance optimale quelle que soit la vitesse de vent.

Sur l'algorithmique de calcul de la MPPT, nous n'agissons que sur un seul paramètre nommé $dperiod$ correspondant à la période d'envoi de la vitesse de référence à la commande. Plus $dperiod$ est petit, plus la consigne de référence est atteinte rapidement. Nous choisissons une valeur de 1ms pour ce paramètre. La validité de la MPPT a été testée avec un échantillon de vent réel (figure 3.15a).

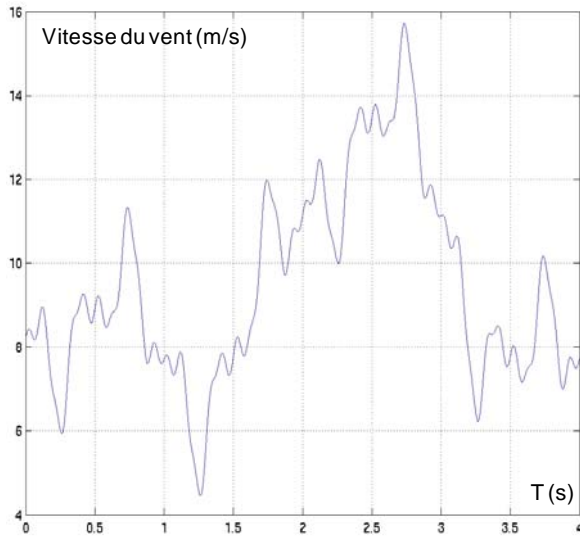


Figure 3.15a. Exemple de profil de vent typique.

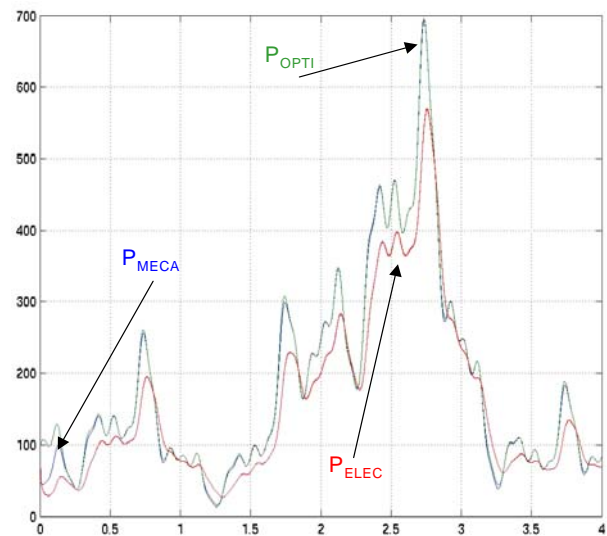


Figure 3.15b. Comparaison des puissances.

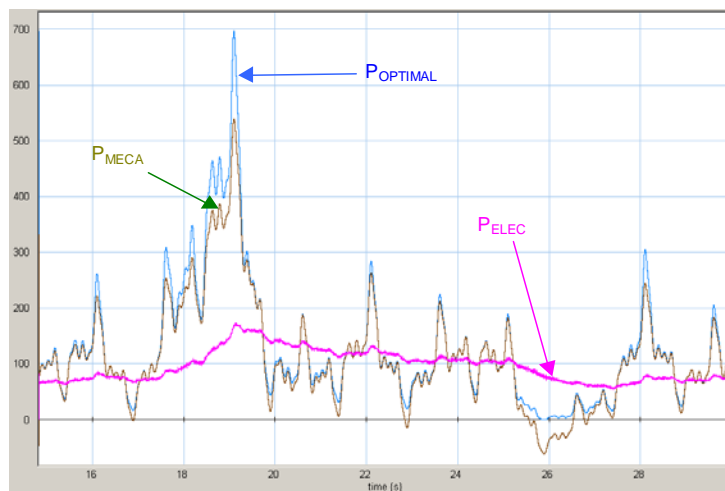


Figure 3.16. Comparaison des puissances.

Les résultats de simulation sont présentés en figure 3.15b. Dans ce premier cas, il n'a pas été tenu compte de la voilure de l'éolienne dans le calcul de l'inertie. La puissance mécanique est alors quasiment égale à la puissance optimale. La puissance électrique, à cause des différentes pertes du système (*principalement les frottements visqueux*), est inférieure mais conserve tout de même l'allure générale de la puissance optimale. On remarque que cette puissance électrique est lissée par l'inertie de l'éolienne. En effet, le terme $J(d\Omega/dt)$ de l'équation mécanique (3.9) "absorbe" les variations rapides de couple entraînant le lissage de la puissance électrique. Ce "lissage" est encore plus frappant lorsque nous effectuons les essais avec une valeur d'inertie tenant compte de la voilure de l'éolienne comme présenté sur la figure 3.16.

Considérons maintenant le choix et la régulation de la tension de bus. Les f.e.m. du moteur synchrone (*de valeur maximale $V_{MAX} = 75V$*) alimentent le bus continu à travers le redresseur. On montre que dans cette configuration (*figure 3.11*), la tension de bus minimale doit être $E \geq 2 \cdot V_{MAX} \Leftrightarrow E \geq 150V$. Si nous considérons les différentes pertes dans le redresseur qui peuvent s'élever à 10% de E , nous obtenons $E = 165V$. Nous choisissons finalement une tension de bus égale à 200V.

Compte tenu de la tension de bus, il faut prévoir un étage d'adaptation pour alimenter la charge (*une batterie de 48V*). Nous choisissons de placer un hacheur abaisseur de type Buck. Ce hacheur doit également

assurer le contrôle de la tension de bus continue : en effet, car le redresseur étant déjà utilisé pour effectuer la commande MPPT, aucun degré de liberté n'existe dans ce convertisseur. Le condensateur noté C mis en parallèle sur le bus permet de limiter les oscillations de tension de bus. Ainsi, côté bus continu, le condensateur C de forte valeur impose un caractère de source de tension à l'entrée du Buck. La batterie ayant également un comportement s'apparentant à une source de tension et la structure du convertisseur étant directe, pour respecter la loi d'interconnexion des sources, on insère une inductance L en série avec la batterie. Cette inductance nous sert à réaliser un contrôle du courant de la batterie, nécessaire pour pouvoir réguler la tension du bus. En effet, pour l'obtention d'une source de tension de bus parfaite, la régulation du niveau de tension aux bornes de la capacité C est nécessaire, donc du courant circulant dans cette dernière.

Nous avons donc conçu une régulation cascade courant-tension pour réguler la tension de bus (*figure 3.17*) avec comme boucle interne de régulation, la régulation du courant I_{BATT} à partir du courant dans l'inductance L . Le courant de référence de cette boucle est fixé par la régulation de tension du bus continu (*figure 3.14*) [III-12]. Les différents dimensionnements de l'inductance L et du condensateur C sont consignés dans [III-8].

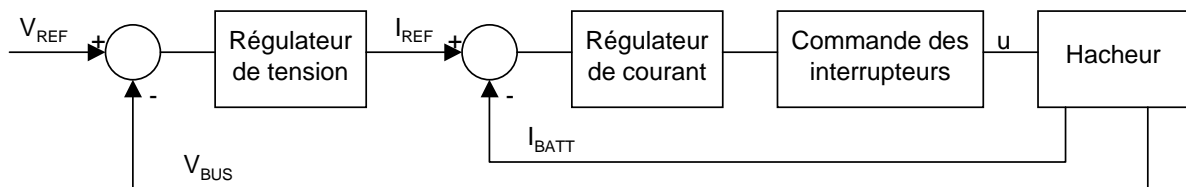


Figure 3.17. Régulation cascade courant-tension de la tension de bus.

III.3.2.4. Perspectives du modèle éolien.

Les compensations effectuées dans la boucle de courant ou la boucle de tension de la commande du hacheur dévolteur, permettant le contrôle de la tension du bus continu, sont pour l'instant idéalisées. En effet, on n'a pas tenu compte de la dissociation réelle entre le système physique et sa commande. Le risque encouru dans ce cas est que le système réagisse plus vite que la commande et donc qu'une mauvaise compensation soit effectuée. Ceci sera réajusté lors des essais réels si nécessaire.

III.3.3. Etudes sur le couplage éolien-PV.

Des travaux sur le couplage entre l'énergie éolienne et l'énergie photovoltaïque ont été menés, dans le cadre des contrats COSEPE et ECODEV/ADEME CNRS, entre les deux laboratoires (*le LEEI et le LAAS-CNRS*). Ils ont tout d'abord porté sur la modélisation de la chaîne de conversion mixte et la réimplantation de modèles développés spécifiquement par chacune des équipes pour avoir une base commune de travail.

Ainsi, à travers le stage de fin d'études ingénieur de M. Julien Richard, co-encadré entre le LEEI et le LAAS-CNRS, deux types de couplage ont été envisagés. Nous montrons ici une synthèse de ces travaux, portant sur une chaîne de conversion mixte PV-éolien comprenant une batterie de 48V.

Le dimensionnement de cette chaîne est en accord avec les moyens expérimentaux mis en œuvre. Ce qui nous permet d'effectuer la validation de ces travaux sur le site expérimental du LAAS.

III.3.3.1. Modélisation sous MATLAB-SIMULINK

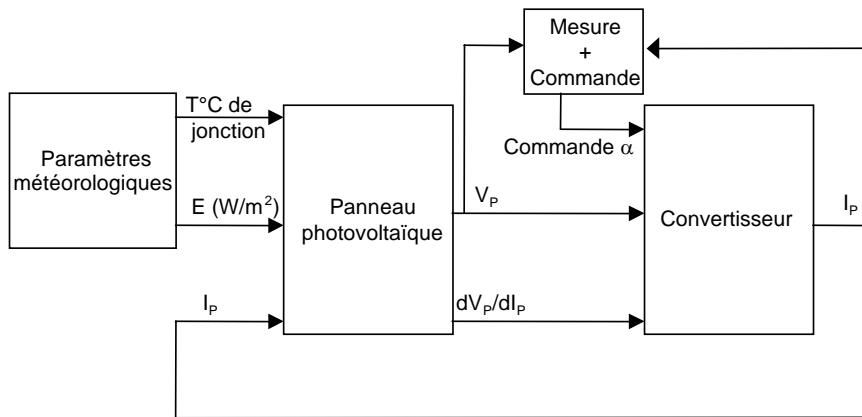


Figure 3.18. Modélisation SIMULINK de la chaîne photovoltaïque.

Dans le cadre de cette étude, la chaîne de conversion mixte PV-éolien a été entièrement modélisée et étudiée à l'aide du logiciel MATLAB-SIMULINK. Il a fallu pour cela retranscrire plusieurs modèles développés antérieurement par chaque équipe sur des logiciels différents.

Ainsi, pour la chaîne de conversion PV élémentaire, le modèle implanté est décrit en figure 3.18. La chaîne PV ainsi modélisée est décomposée en blocs fonctionnels :

- "Paramètres météo", définissant les conditions d'irradiation et de température extérieure,
- "Panneau photovoltaïque", simulant le fonctionnement d'un panneau photovoltaïque,
- "Convertisseur", simulant le fonctionnement d'un convertisseur de type Buck,
- "Mesure + Commande", définissant la qualité de la mesure (*insertion d'un bruit de mesure*) et la génération de la commande du convertisseur.

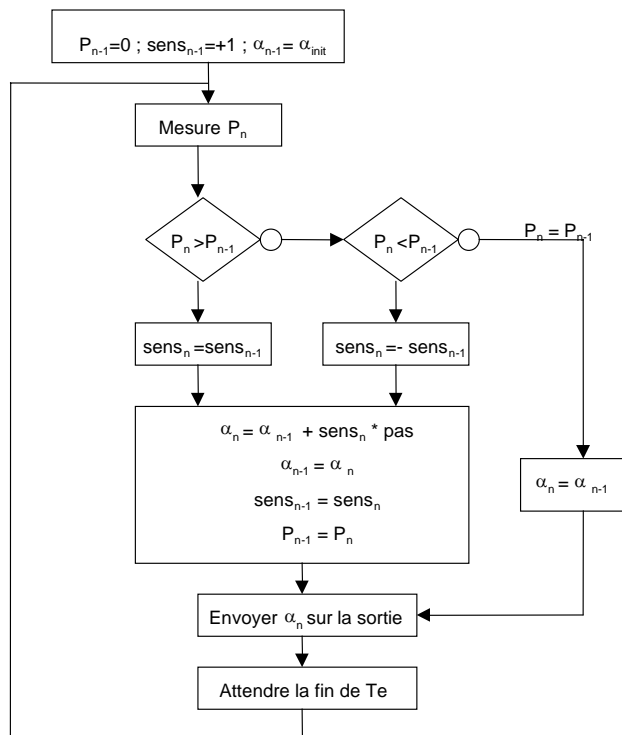


Figure 3.19. Algorithme de commande MPPT numérique.

Par ce biais, un autre type de commande MPPT, différent de celui développé au chapitre 2, a été étudié, allant vers des commandes tout numériques (figure 3.16). Comme dans le cas des MPPT analogiques, l'objectif de cette commande est également de trouver le meilleur compromis entre les différents paramètres vitesse et précision.

- Modélisation d'un Panneau photovoltaïque sous MATLAB.

Nous mettons en équation dans ce bloc un panneau comportant N_s cellules en série et N_p cellules en parallèle, en faisant l'hypothèse que toutes ces cellules sont identiques et en s'appuyant sur les équations développées au chapitre 1 :

$$\begin{aligned}
 (\alpha) \rightarrow V_p &= N_s V_D - \frac{N_s}{N_p} R_s I_p \\
 (\beta) \rightarrow I_p &= N_p (I_{CC} - I_D) - \frac{N_s V_D}{\frac{N_s}{N_p} R_{SH}} = N_p (I_{CC} - I_D - \frac{V_D}{R_{SH}}) \\
 (\chi) \rightarrow I_D &= I_s (\exp(\frac{V_D}{\eta V_T}) - 1)
 \end{aligned} \tag{3.9}$$

Grâce à ce modèle, la tension V_p du panneau est calculée à partir du courant de panneau I_p , de l'ensoleillement I_{CC} et de la température du panneau T , comme décrit sur la figure 3.17.

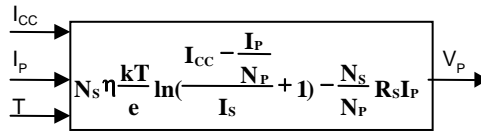


Figure 3.20. Calcul de la tension V_p du panneau.

- Résultats de simulation et choix des paramètres de commande MPPT pour la chaîne PV.

Pour tester le bon fonctionnement du modèle, on relève en boucle ouverte l'évolution de la puissance (*rampe entre 0 et 1 envoyée sur l'entrée de commande*) avant de se placer en boucle fermée et de piloter le convertisseur avec la MPPT.

Il existe dans ce modèle deux paramètres essentiels qui influent sur les résultats de simulation : le paramètre *Pas* qui est le pas d'évolution de la commande et le paramètre *Téch* qui n'est autre que la cadence d'échantillonnage de la commande. Aucune méthode simple n'étant proposée dans la littérature, le réglage des paramètres est effectué par une méthode heuristique en fixant la cadence d'échantillonnage *Téch* supérieure au temps de réponse du système (*ici, 2ms*), avec un pas d'évolution de la commande petit devant la plage de valeurs possibles pour la commande. Les essais sont effectués sur un seul panneau PV.

Les différentes figures 3.21a, 3.21b, 3.21c et 3.21d montrent l'influence des paramètres *Téch* et *Pas*. Le paramètre *Pas* modifie l'amplitude des oscillations de puissance autour de l'optimum alors que le paramètre *Téch* modifie la fréquence des oscillations. L'objectif dans ce cas est donc de trouver le meilleur compromis entre les deux paramètres selon les désirs de l'utilisateur.

Il est à remarquer qu'un problème se pose sur les paramètres de simulation. En effet, le fonctionnement d'une S-Fonction montre que celle-ci envoie la commande du convertisseur une période d'échantillonnage après l'avoir calculée. Or, nous souhaitons que l'envoi de la commande se fasse de façon immédiate après le calcul de la puissance. Ce problème est en cours de résolution.

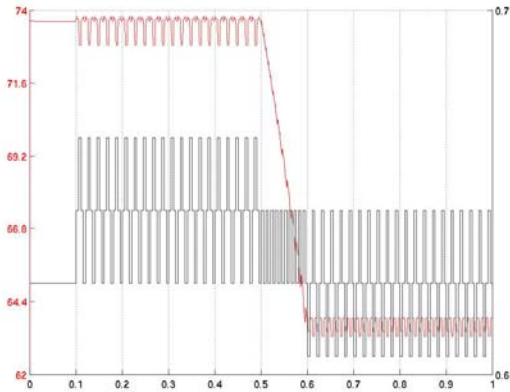


Figure 3.21a. $T_{éch}= 5\text{ms}$ et $Pas= 0.02$.

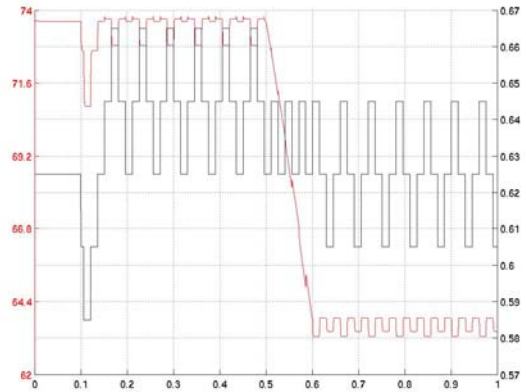


Figure 3.21b. $T_{éch}= 15\text{ms}$ et $Pas= 0.02$.

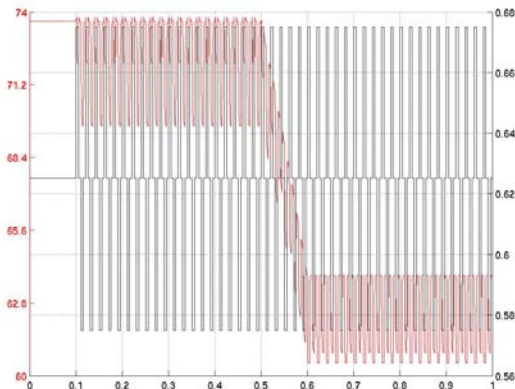


Figure 3.21c. $T_{éch}= 5\text{ms}$ et $Pas= 0.05$.

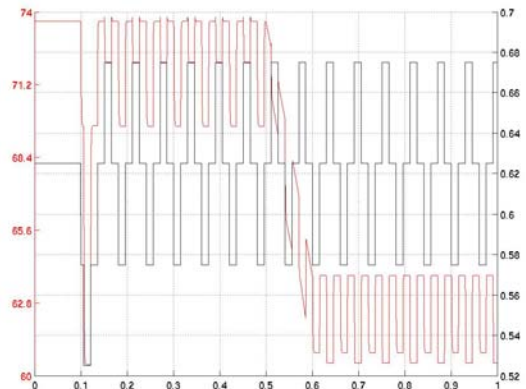


Figure 3.21d. $T_{éch}= 15\text{ms}$ et $Pas= 0.05$.

- Limites du modèle photovoltaïque.

La modélisation du hacheur Boost n'est valable qu'en conduction continue. La modélisation du panneau sous Matlab entraine une variation de la tension V_P avant le courant I_P . Si le saut d'ensoleillement dans le bloc "paramètres météo" est à la fois trop grand et trop rapide (*exemple : $400\text{W}/\text{m}^2$ en 1ms*), la tension V_P devient nulle grâce à l'insertion dans le modèle d'une butée. Mais le choix de I_P comme variable d'état du panneau nous a contraint à créer la variable dI_P/dV_P , qui tend vers zéro lorsque la tension du panneau s'annule. Le modèle n'est donc pas valable dans ces conditions.

Une des solutions pour éviter cette défaillance est en fait de reprendre la tension V_P comme variable d'état du panneau et d'implanter une boucle algébrique pour le calcul du courant I_P . Ceci provoque la disparition du terme dI_P/dV_P , mais entraîne un allongement du temps de calcul.

III.3.3.2. Couplage des deux chaînes.

Une fois tous les modèles élémentaires validés, nous avons effectué le couplage des deux chaînes, comme présenté sur la figure 3.22. Certains dimensionnements ont été arbitraires et certains points sont à étudier dans ce couplage, comme le niveau de la tension de la batterie ou encore le type de hacheur DC-DC à utiliser (*Buck, Boost*).

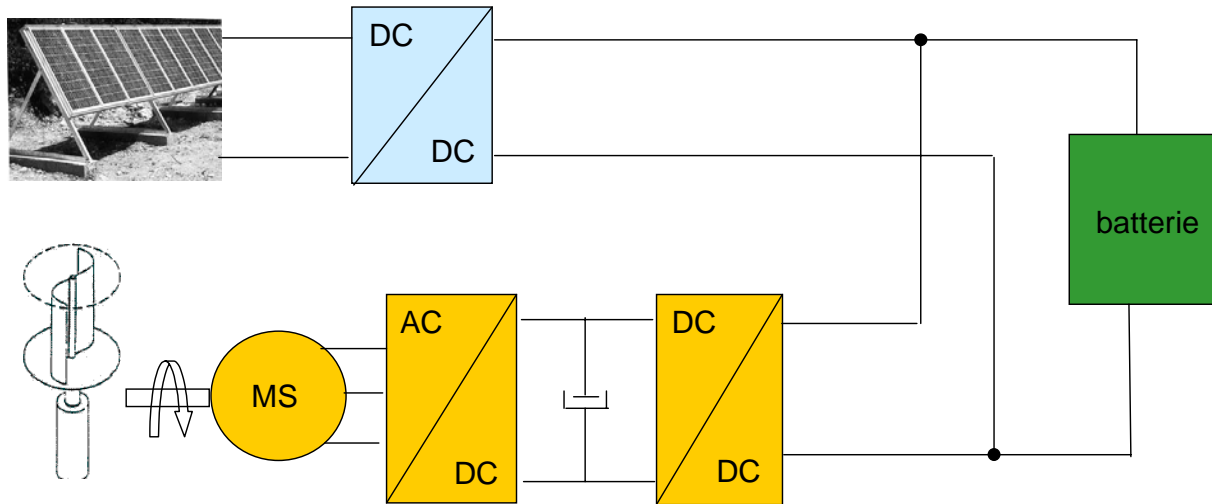


Figure 3.22. Synoptique du système couplé.

- La batterie.

Le modèle de batterie utilisé dans ces travaux a été développé par le LEEI. Nous rappelons ici les principaux éléments de la modélisation implantée sous SIMULINK. La batterie peut se modéliser par la mise en série ou parallèle de cellules élémentaires, chacune étant constituée par une force électromotrice E_0 en série avec sa résistance interne R (figure 3.23a).

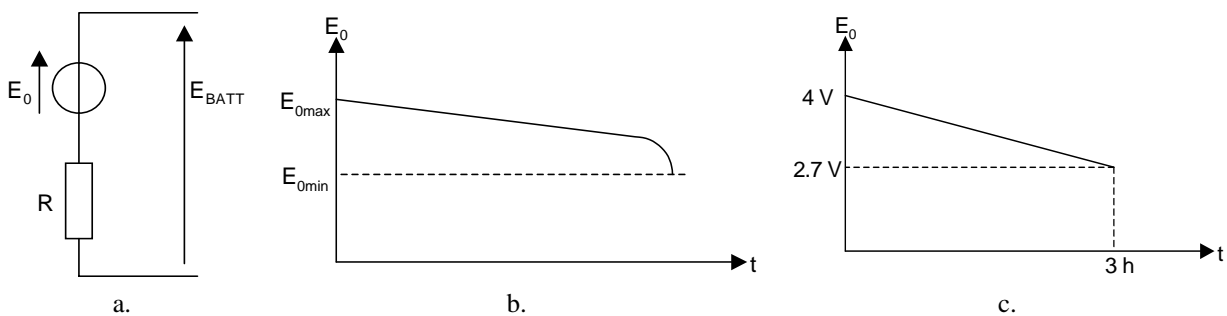


Figure 3.23. a. Modélisation de la batterie – b. Caractéristique réelle de la f.e.m. E_0
c. Caractéristique constructeur de E_0 .

La f.e.m. E_0 , dans le cas d'une cellule réelle, diminue au cours de la réaction de décharge jusqu'à atteindre une tension dite "d'arrêt" (E_{0min}), au-delà de laquelle la cellule n'est plus utilisable. Sa caractéristique typique est présentée sur la figure 3.23b. L'état de charge de chaque cellule découle d'une grandeur appelée capacité de la cellule, définie en réalisant une décharge à courant constant jusqu'à atteindre la tension d'arrêt.

La capacité C représente la quantité de charge accumulée sur un temps donné et est obtenue par intégration du courant sur la totalité de la décharge :

$$C = \int_0^i i(t) dt = I \cdot \int_0^i dt = I \cdot \Delta t \quad (3.10)$$

La batterie modélisée est une batterie LITHIUM-IONS présentant les caractéristiques suivantes $E_{0nom} = 3.6V$, $E_{0max} = 4V$, $E_{0min} = 2.7V$, $C_3 = 41Ah$, $R = 2 \text{ m}\Omega$. La capacité C_3 correspond à une décharge complète de la cellule à courant constant en 3 heures. Pour cette décharge, le courant de décharge I_3 est de 13.6A. La capacité C_i représente la quantité d'électricité accessible lors d'une décharge en i heures. Elle se calcule par l'intermédiaire de la relation empirique de Peukert :

$$C_i = C_3 \cdot \left(\frac{I_i}{I_3}\right)^{1-n} \quad (3.11)$$

Le paramètre n doit permettre de reproduire au mieux le comportement de la capacité potentielle de la cellule en fonction du courant débité. Nous prenons pour notre batterie Ion-Lithium un n égal à 1.1 (*une batterie Plomb-Acide se voit généralement attribué $n = 1.3$*). Dans le cas d'une décharge à courant I_{BATT} constant, l'état de charge EDC s'exprime comme suit :

$$EDC(t) = 1 - \frac{I_{BATT} \cdot t}{C_i} \quad (3.12)$$

EDC vaut 0 quand E_0 est égal à E_{0min} . EDC vaut 1 quand E_0 est égal à E_{0max} . Si $C_i = C_3$ et que $I_{BATT} = I_3$, nous avons bien $EDC = 0$ pour $t = 3$ heures. Cependant, dans le cas de notre application, compte tenues des caractéristiques des sources d'énergie, le courant I_{BATT} est constamment variable au cours du temps. Nous discrétisons l'équation précédente pour arriver à pouvoir faire l'hypothèse que le courant reste constant entre deux pas de calcul. Nous prenons aussi en compte les phases de recharge ou de décharge de la batterie, d'où un ΔEDC positif ou négatif :

$$\Delta EDC = \pm \frac{|I|}{C_i} \cdot \Delta t = \pm \frac{|I|}{C_3} \left(\frac{|I|}{I_3}\right)^{n-1} \cdot \Delta t \Rightarrow EDC_k = EDC_{k-1} + \Delta EDC \quad (3.13)$$

Pour l'accumulateur Li-Ions modélisé, l'expression finale de la f.e.m. E_0 en fonction de l'état de charge EDC de la cellule est donné par l'équation suivante, implémentable dans une S-Fonction nous permettant de simuler le fonctionnement de la batterie sous MATLAB :

$$E_0 = 4 - 1.3 \cdot (1 - EDC) \quad (3.14)$$

- Choix du niveau de tension batterie.

La tension de la batterie, organe de liaison entre la chaîne de conversion éolienne et la chaîne, a finalement été fixée à 48V (*12 batteries de 4V en série*). En effet, le bus continu entre les convertisseurs AC/DC et DC/DC de la chaîne éolienne étant égal à 200V, le choix d'une tension de batterie inférieure à 48V implique une utilisation du hacheur DC/DC dans des zones de fonctionnement "limites", ou le rapport cyclique serait égal au maximum à 0,1.

En résumé, le choix de la tension batterie est donc en grande partie imposé par la chaîne éolienne. La chaîne photovoltaïque n'intervient pas dans le choix de la tension batterie car la modularité des panneaux photovoltaïques permet une association série-parallèle impliquant une augmentation de la tension disponible en sortie de l'association des panneaux (*exemple : 2 panneaux en série permettent de disposer d'une tension égale à 34V en entrée du hacheur DC/DC de la chaîne photovoltaïque*).

Ce choix de tension batterie a impliqué le choix du type de hacheur pour chacune des deux chaînes : hacheur survolteur pour la chaîne photovoltaïque et hacheur dévolteur pour la chaîne éolienne. Ces deux types de couplage ont été étudiés et sont présentés par la suite.

III.3.3.3. Couplage sur la batterie.

Après plusieurs essais préliminaires sous conditions variables de vent, ensoleillement et charge, on peut constater qu'à première vue, du point de vue électrique, il n'y a pas trop de problèmes pour réaliser ce type de couplage.

Une première amélioration devra être apportée à la commande MPPT numérique de type "photovoltaïque". En effet, si le courant de batterie subit des variations très rapides de courant de période inférieure au temps de réponse du système, la puissance extraite du panneau ne restera pas forcément optimale, car la MPPT implantée n'a pas une dynamique assez rapide.

Un exemple de résultats obtenus après couplage par la batterie est présenté en figure 3.24. Dans l'ensemble, le comportement semble correct. Cet essai présente la puissance extraite du panneau ainsi que le courant de batterie. Cependant, à $t = 0.45s$, le courant présente une perturbation de période inférieure au temps de réponse du système ($2ms$), entraînant l'apparition de petites oscillations supplémentaires sur le générateur PV. Ce type de comportement mérite d'être approfondi. Nous comptons sur les essais réels pour pouvoir confirmer l'existence de tels comportements.

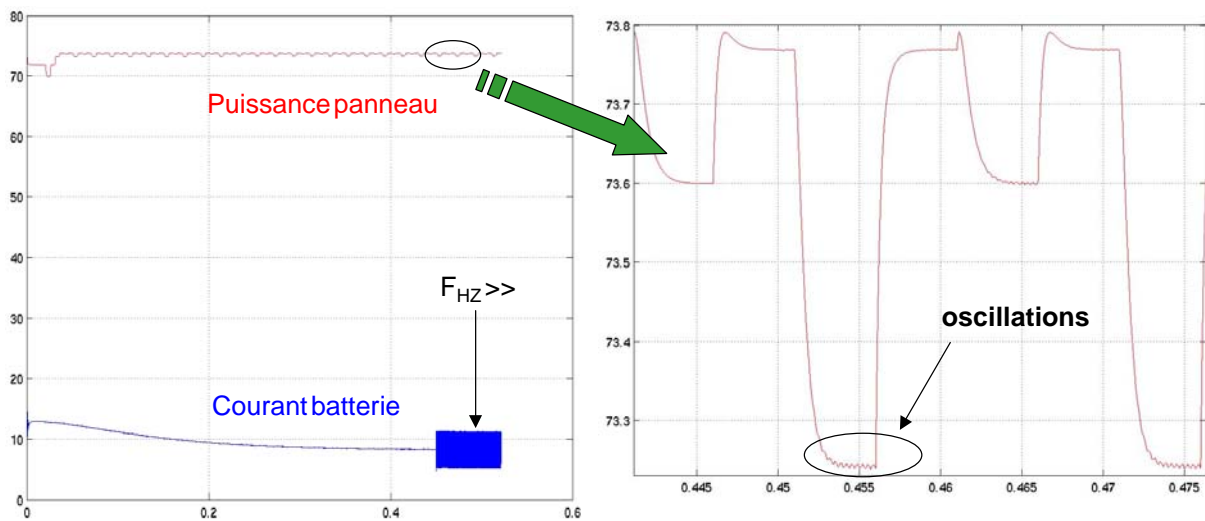


Figure 3.24. Puissance PV et courant batterie.

III.3.3.4. Couplage par la MPPT.

Une autre possibilité de couplage entre les deux chaînes réside dans l'utilisation du même type de MPPT pour l'ensemble du système. Les premiers résultats de simulation sont consignés dans des figures 3.25a et 3.25b.

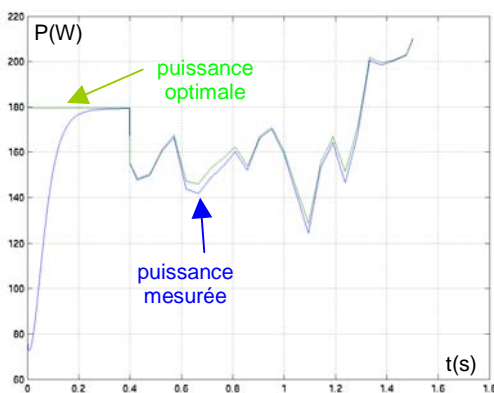


Figure 3.25a. Puissance de sortie.

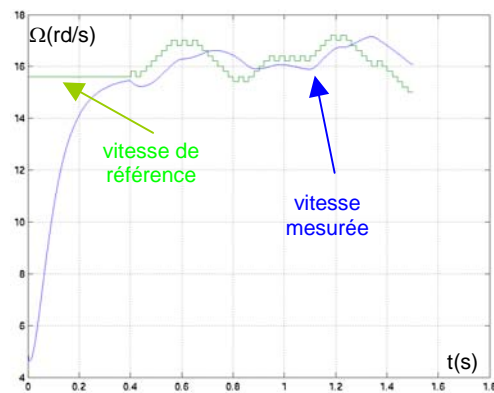


Figure 3.25b. Vitesse de rotation.

On remarque sur ces essais qu'il est nécessaire de fonctionner en boucle ouverte au démarrage (*jusqu'à 0.4s*) afin d'initialiser les variables nécessaires au fonctionnement en MPPT. Le constat de ces essais est que

la puissance mesurée suit très bien la puissance optimale, malgré la différence importante de dynamique existante entre les 2 systèmes de conversion. Il est à remarquer que la vitesse de vent dans ce cas varie très peu en amplitude (entre 9,4 et 10,1 m/s). Un autre essai à vitesse de vent fortement variable (entre 4 et 16 m/s) est effectué.

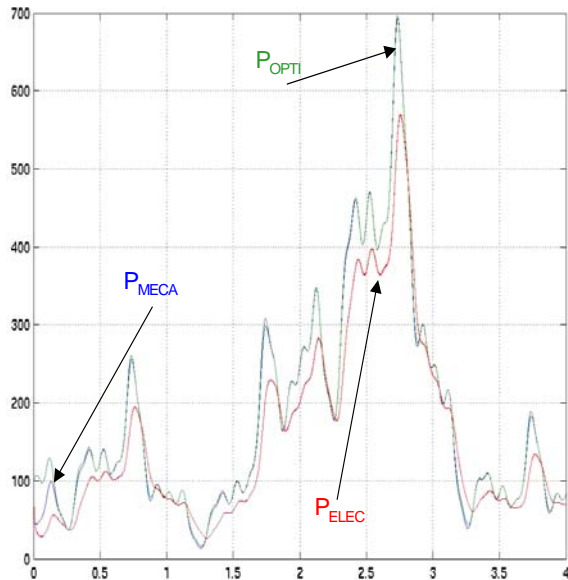


Figure 3.26a. Utilisation de MPPT "éolienne".

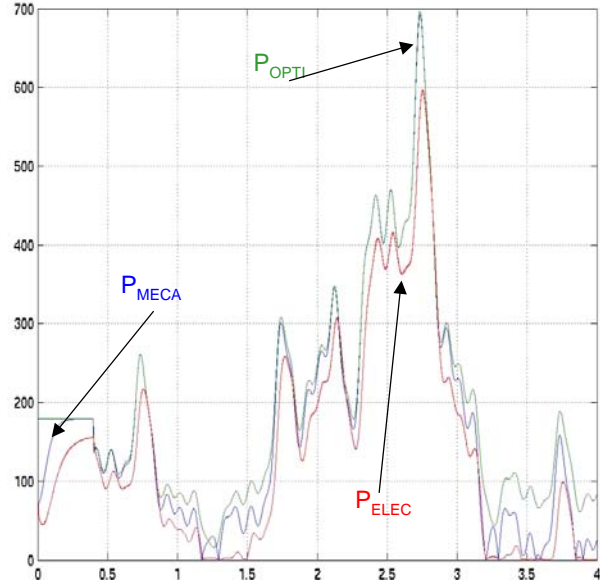


Figure 3.26b. Utilisation de MPPT "photovoltaïque".

On constate dans ce cas que la MPPT de type "éolienne" convient mieux à une vitesse de vent fortement variable en amplitude. Malgré tout, il convient d'effectuer des bilans énergétiques sur des temps plus longs, ce qui permettrait de mieux juger l'apport de l'une ou l'autre des deux MPPT sur la chaîne éolienne. Ces bilans énergétiques n'ont pas encore été effectués.

III.3.3.5. Conclusion et perspectives sur le couplage.

De cette étude, il a été constaté en simulation que l'association éolienne-PV fonctionne correctement dans son ensemble, d'un point de vue dynamique. Nous avons pu également constater que l'utilisation d'une même commande MPPT était possible pour l'ensemble PV-éolien, mais que le gain apporté par cette utilisation commune était difficile à estimer.

Des bilans énergétiques précis devraient permettre d'apporter des éléments de réponse plus précis. Les études en cours aujourd'hui se concentrent sur la mise en place de la partie validation expérimentale de ces travaux. Le site du LAAS, bien que déjà grandement équipé, doit subir quelques adaptations pour accueillir l'éolienne de 800 W. le choix des batteries s'oriente vers des batteries à plomb pour des raisons de prix. Les premiers résultats expérimentaux vont permettre de mieux approfondir le comportement de ce type de chaîne mixte dans les conditions réelles du site.

D'un autre côté, un niveau de modélisation fonctionnelle doit être développé pour pouvoir poursuivre des études d'optimisation sur le couplage. Ce niveau de modélisation plus élevé, dans lequel le fonctionnement structurel (*phénomènes de temps courts*) est absent, va permettre d'accélérer certaines simulations. Les objectifs de ces travaux se poursuivent actuellement par :

- Des tests et validations expérimentaux de cette chaîne de conversion mixte sur le site de démonstration du LAAS,

- Des études comparatives des différentes lois de commande spécifiques (MPPT), mises au point par les deux équipes (LAAS et LEEI),
- L'étude et l'optimisation des deux systèmes éolien et photovoltaïque.

D'autres points d'optimisation seraient intéressants à étudier, comme l'utilisation d'une inductance commune ou individuelle dans le cas de l'utilisation d'un hacheur DC/DC dévolteur, pour chacune des deux chaînes de conversion.

Il est à noter tout de même que les modélisations présentées dans ce rapport sont des modélisations en valeur moyenne et ne permettent donc pas de voir ce qui se passe au démarrage du système, la modélisation n'étant pas valable dans ce cas.

Nous avons constaté que l'utilisation d'une même commande MPPT était possible pour l'ensemble éolien-photovoltaïque, mais que le gain apporté par cette utilisation commune de la même MPPT restait à être étudiée à l'aide de bilans énergétiques.

Il est à noter que ces travaux favorisent l'existence d'une collaboration entre le LAAS-CNRS et le LEEI, se poursuivant aujourd'hui par un nouvel encadrement de stage de DEA et éventuellement une thèse co-encadrée dans le domaine de la conversion d'énergie.

III.3.4. Synthèse et perspectives.

A notre connaissance, il y a encore aujourd'hui peu d'études consacrées à une approche méthodologique et systémique de la conception de ces systèmes, comme il a été mené dans ce projet pour en optimiser globalement les performances, en tenant compte des problèmes de fiabilité inhérentes à la forte production d'énergie. C'est donc par un approfondissement systématique des connaissances sur le comportement des différentes sources et l'amélioration de leur couplage que ces énergies seront à terme mieux maîtrisées et répondront au mieux aux besoins des utilisateurs et à leurs variations, quelle que soit la gamme de puissance.

Pour ce qui est de la transposition des études que nous menons actuellement à des fortes productions d'énergie, la cohabitation du photovoltaïque et de l'éolien reste un sujet d'étude à part entière, étant données les différences entre ces deux sources et les problèmes de stockage à résoudre.

Encore aujourd'hui, en 2003, dans le domaine des énergies renouvelables, les recherches menées sur les systèmes de conversion électrique en tant qu'adaptateur d'impédance et, plus largement, sur le système complet du traitement de l'énergie (*production, stockage, conversion*) sont rares. Pour ce qui est de l'état des recherches en France, quelques laboratoires de Génie Electrique, nouveaux par rapport aux partenaires actuels de ce projet, affichent récemment un effort sur cette voix du couplage multi-sources, comme le laboratoire LESIR-SATIE antenne de Rennes, le LEM de Montpellier, l'école des mines antenne de Sophia-Antipolis et le LEG de Grenoble.

L'ampleur des études à effectuer nécessite des moyens humains et matériels importants. A travers le programme pluri-disciplinaire Energie et le RTP Energie Electrique du département STIC, le CNRS tente d'amorcer de nouvelles études accompagnées de partenaires industriels.

III.4. La problématique du stockage.

III.4.1. Cadre des recherches.

Les convertisseurs statiques, adaptés à l'énergie solaire photovoltaïque, sont souvent appelés dans le commerce « convertisseurs solaires ». Ils ont pour objectif d'adapter l'énergie électrique provenant des panneaux photovoltaïques, pour pouvoir alimenter des charges alternatives compatibles avec un réseau électrique local ou bien alors charger des batteries, comme on peut le voir figure 3.23.

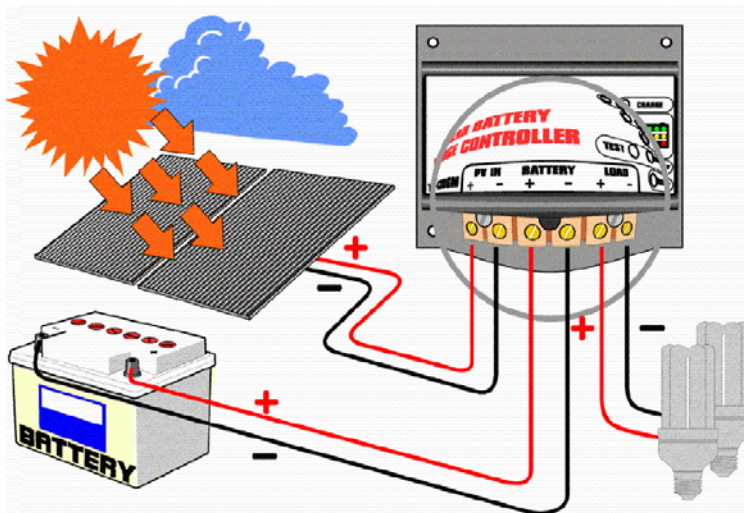


Figure 3.27. Chaîne de puissance [III-14].

Les régulateurs disponibles sur le marché sont majoritairement des régulateurs automatiques de charge. Ils intègrent différents types de protection pour assurer la fiabilité du système de conversion. La plupart d'entre eux ne prélèvent pas la puissance maximale qui pourrait être délivrée par les panneaux photovoltaïques. En effet, ces régulateurs qu'on pourrait appeler « classiques » effectuent une connexion directe entre les panneaux solaires et la batterie quand celle-ci est déchargée. La charge s'effectue donc sous une tension de panneau V_{PV} , imposée par la tension de la batterie, cette dernière variant selon l'état de charge de la batterie (de 10V à 14V pour une batterie à plomb de 12V nominal).

D'autres régulateurs recherchent le point optimal de fonctionnement, nommé PPM (*Point de Puissance Maximale*) et correspondant à une tension et un courant de panneau PV optimaux (nommés respectivement V_{OPT} et I_{OPT}), pour lesquels la puissance débitée par le générateur photovoltaïque est maximale. Cette puissance maximale dépend d'un certain nombre de paramètres météorologiques dont le niveau d'irradiation solaire et la température.

L'étude comparative effectuée par le LAAS-CNRS, en partenariat avec EDF, consiste à évaluer les performances de divers chargeurs de batteries solaires les plus performants sur le marché. Pour cela, l'étude s'est effectuée en deux parties :

- L'évaluation des performances de divers chargeurs à travers les informations fournies par les constructeurs en vue de l'achat de quelques exemplaires,
- Le test en site réel, afin d'évaluer de façon comparative les chargeurs retenus dans l'étape précédente.

III.4.2. Différents types de cycles de charge d'une batterie Pb.

Pour bien comprendre le fonctionnement des chargeurs de batteries du commerce et pouvoir mieux comparer leurs performances, nous nous sommes penchés sur les principales méthodes de charge appliquées actuellement aux batteries Plomb-Acide. Jusqu'à présent nous n'avons étudié dans le contexte photovoltaïque que ce type de batterie. En effet, son faible coût et ses performances maintenues en température (*fonctionnement en températures extrêmes*) par rapport aux autres types de batteries font que ce sont toujours les plus utilisées pour les systèmes photovoltaïques terrestre. De plus, nous rappelons l'influence de la température sur la charge de la batterie en fin de cette partie.

La charge appropriée d'une batterie (*dans notre cas de type plomb-acide*) est prépondérante pour obtenir une durée de vie optimale, quelles qu'en soient les conditions d'utilisation de cette batterie. Une recharge de batterie qui permet d'augmenter sa durée de vie et ses performances doit répondre à quelques normes générales comme celles décrites ci-dessous, [III-15] :

- Pendant la phase de démarrage de la charge, le courant de charge doit être inférieur à la valeur qui produit une tension moyenne sur la cellule de la batterie inférieure à la tension de gazéification (*environ 2.4V par cellule*).
- Pendant la phase de recharge et jusqu'à ce que 100% de la décharge précédente ait été récupérée, le courant de charge doit être contrôlé pour maintenir la tension aux bornes de la cellule inférieure à la tension de gazéification.
- Quand 100% de la capacité déchargée a été récupérée sous le contrôle de la tension citée ci-dessus, l'index de charge doit chuter à une valeur d'environ à un vingtième de la capacité (*exprimée en Ah*) de la batterie. Alors à partir de ce moment-la, la charge doit être effectué à courant constant.

Plusieurs méthodes [III-15] de charge permettent de respecter les considérations précédentes. Les définitions de quelques notations sont nécessaires avant de continuer. Ainsi, on appellera « niveau de courant de charge » un courant en ampères qui est fourni à la batterie. L'état de charge d'une batterie est la quantité d'énergie électrochimique disponible dans une batterie. La capacité d'une batterie est, quant à elle, la quantité d'électricité pouvant être créée par la réaction électrochimique et est définie en Ah (*Ampère-heure*).

III.4.3. Influence de la température sur la charge d'une batterie plomb – acide.

La température de la batterie est un paramètre important à considérer si l'on veut assurer une charge appropriée de cette dernière. Pour des températures plus élevées, la tension nécessaire pour récupérer la totalité de la capacité d'une cellule en un temps donné est réduite à cause de la réduction du temps du cycle de la réaction interne de la batterie.

La courbe de la figure 3.28 [III-15] illustre la dépendance de la charge avec la température. Pour tenir compte de ce phénomène et maximiser la durée de vie de la batterie, un coefficient négatif de charge d'environ $-2.5\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ par cellule devra être utilisé pour des températures éloignées de 25°C . Ainsi, la variation de la tension de charge en fonction de la température prévient les problèmes thermiques quand la batterie est chargée à haute température, et assure ainsi une charge appropriée quand la température de la batterie est faible.

Quelques circuits intégrés, qui consistent par ailleurs en des contrôleurs de charge de batterie, présentent déjà la possibilité d'une variation de la tension de charge en fonction de la température [III-16]. Ainsi, certains chargeurs du commerce le présentent déjà en option [III-17, III-18, III-19].

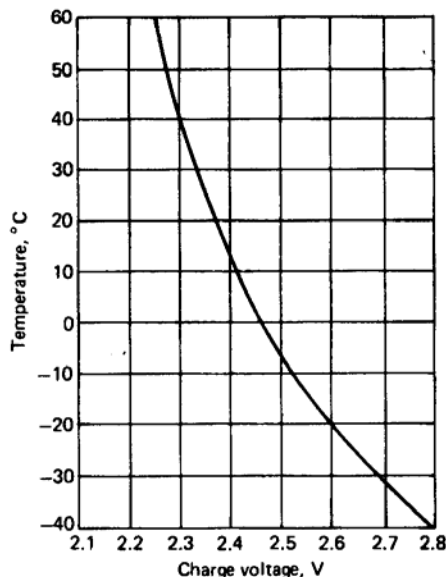


Figure 3.28. Tension de charge recommandée pour différentes températures de batterie (*Compensation de Température*).

Pour bien établir les critères de comparaison des divers chargeurs de batteries du commerce, utilisant chacun une partie de ces charges, nous rappelons les définitions exactes de ces charges. Toutefois, certains chargeurs [III-18] réalisent une charge avec une gazéification forcée sous contrôle [III-15]. Cette méthode sert à éliminer la stratification des électrolytes produite pendant les longues périodes de décharge de la batterie. Le contrôle de la stratification permet de préserver la capacité et la durée de vie des batteries. Cet aspect est très intéressant du point de vue de la durée de vie des batteries.

III.4.4. Etudes en cours et perspectives.

Des travaux sur la modélisation des éléments de stockage utilisés dans des conditions extrêmes se sont rapidement avérés nécessaires lors des différentes études menées, autant sur l'énergie PV proprement dite que sur le couplage. En effet, l'élément de stockage est de plus en plus au cœur de la production de sources d'énergie ayant des caractéristiques fluctuantes. Cet élément permet en effet de réguler la production et de jouer le rôle d'étage tampon entre la production d'énergie et son utilisation.

Cependant, les cycles de charge et de décharge sont tels que le vieillissement des éléments de stockage est très rapide (*souvent moins de trois mois dans le cas de sources PV*).

Nous avons dans ce contexte démarré fin 2002 une collaboration entre le CIRIMAT et le LAAS-CNRS, afin de modéliser le comportement de batteries de stockage en utilisation réelle, comprendre les causes de vieillissement puis ensuite améliorer les organes de stockage. Les premières études sont en cours sur le site expérimental du LAAS sur des batteries à plomb. Elles font l'objet d'un co-encadrement de stage de un an de M. Fairid Boudjellal.

Chapitre 4

Micro-convertisseurs intégrés.

IV.1. Introduction.

IV.1.1. Généralités.

Aujourd'hui, la maturité des études engagées sur l'énergie photovoltaïque confirme la pertinence du concept de modularité. En effet, la discrétisation de la chaîne de conversion apporte une meilleure fiabilité du système et garantit plus facilement un taux de production d'énergie. Aujourd'hui, la maturité de ce concept est tel qu'il intéresse différents acteurs du photovoltaïque en France comme EDF, Photowatt, l'Ademe, BP Solarex et Total Energie.

Si l'on se place dans une optique d'optimisation des étages d'adaptation, il faut encore renforcer les études entreprises sur l'amélioration de chaque élément participant à la conversion de puissance (*étage de puissance, de contrôle, de sécurité mais aussi de stockage*). Pour cela, il faut poursuivre la discrétisation de la chaîne de conversion jusqu'à atteindre l'échelle ultime d'un convertisseur élémentaire par cellule PV. Ainsi, si une des cellules est défaillante, son impact sur le reste du générateur sera faible.

Cette idée a été validée en 2001 et encouragée par l'action spécifique CNRS intitulée «Energie portable», pilotée par le Professeur Robert Perret du LEG de Grenoble. Cette action a permis d'établir une première collaboration avec l'équipe du Professeur Pierre Destruel du LGET, travaillant sur la synthèse et la création de cellules PV organiques dites de troisième génération et celle de Denis Mencaraglia, Directeur de recherche au LGEP, pour la caractérisation des cellules PV. Etant donnée l'ampleur des travaux et la complémentarité entre les trois équipes qui ne couvrait pas la totalité des tâches à faire, nous avons à nouveau soumis cette idée au RTP « Energie Electrique » du CNRS qui l'a labellisée en 2002 auprès du département STIC du CNRS sous forme d'une nouvelle action spécifique intitulée « Cellules organiques : du matériau au traitement de l'énergie PV ». Dans cette nouvelle action, les équipes de recherche du CRTT de Bordeaux, assurant la synthèse des matériaux organiques, du CIRIMAT pour les matériaux magnétiques, du LGET et du LEG pour les capacités intégrées se sont jointes à nos efforts.

Dans le cadre de ces deux actions, le LAAS s'est plus particulièrement intéressé à l'étage de conversion de puissance, transformant et restituant l'énergie électrique PV. Dans les solutions actuelles, cet étage est encore aujourd'hui constitué de composants de puissance discrets, choisis pour leurs performances à une puissance et une fréquence de fonctionnement données (*semi-conducteurs, drivers, condensateurs, inductances, filtres, transformateur*). Des rendements de conversion supérieurs

à 90% sont obtenus sans trop de difficulté lorsque la puissance crête à transférer est supérieure à 50W. Ceci permet de considérer cet étage comme transparent et de négliger ainsi son influence vis à vis du reste de la chaîne de conversion.

L'évolution des nouveaux générateurs PV, allant vers une discrétisation plus fine de la chaîne de conversion électrique, pose à nouveau le problème des rendements aux faibles puissances ($< 10W$). En effet, pour cette gamme de puissance et en dessous, outre le nombre d'étages de conversion qui va se multiplier et atteindre des encombrements importants, les composants discrets existants aujourd'hui n'ont pas les performances requises pour assurer des rendements de conversion élevés. Nous avons donc entrepris d'intégrer l'étage de conversion de puissance électrique au plus près de la source PV, afin de minimiser au maximum les diverses connexions génératrices de pertes et l'encombrement de l'étage de conversion.

Compte-tenu des nombreux verrous technologiques à résoudre, nous nous sommes intéressés dans un premier temps à l'intégration de l'étage de contrôle, assurant la fonction MPPT. Cette démarche, visant à intégrer les organes de commande et de sécurité proches des composants actifs qu'ils pilotent, est actuellement en cours de réalisation à travers la thèse de M. Angel Cid Pastor, se déroulant en partenariat avec EDF dans le cadre d'un contrat CIFRE [IV-1]. Concernant la partie conversion de puissance, nous nous sommes focalisés sur l'obtention de composants passifs inductifs intégrés, constituant actuellement le point bloquant permettant d'arriver à créer des convertisseurs tout intégrés. Ces travaux, débutés en 2000 par l'établissement d'une collaboration interne entre l'équipe MIS et TMN, se poursuivent aujourd'hui à travers le DEA puis la thèse de M. Alain Salles [IV-2].

Notre objectif étant de concevoir l'ensemble des organes de conversion sur le même support que la micro-source d'énergie constituée par quelques cellules PV, nous avons de plus déposé un projet interne LAAS visant à fédérer l'ensemble des compétences internes du laboratoire concernant l'intégration de puissance.

IV.1.2. Situation des travaux dans les programmes de recherche.

Cette partie des travaux, débutée en 2000, entre dans la problématique plus large de l'intégration des différentes fonctions nécessaires au bon fonctionnement d'un convertisseur de puissance. En plus des actions spécifiques précédemment citées, ils sont supportés financièrement par l'Action concertée « Energie » du CNRS depuis 2002 et entrent dans les travaux prospectifs des Groupements d'Actions Thématiques (GAT) « Photovoltaïque » et « Gestion et stockage de l'électricité ». Comme des retombées peuvent intéresser des problématiques plus larges que les énergies portables de très faibles puissances, ils entrent aussi dans les préoccupations du GdR « Intégration de Puissance », regroupant en France divers acteurs du Génie Electrique et du RTP « Energie Electrique ».

En 2003, ces travaux pluridisciplinaires, nécessaires à la réalisation de ces étages de conversion, ont été encouragés par le LAAS-CNRS par l'obtention d'un financement propre, suite à la demande du projet transversal intitulé « Micro-sources et micro-alimentations intégrées tenant compte des contraintes spécifiques aux MEMS et MOEMS ». Ce projet interne du LAAS-CNRS sur une année devrait permettre de mieux fédérer toutes les compétences acquises dans ce laboratoire, afin d'arriver

à réaliser un prototype de convertisseur intégré de quelques milliwatts, validant les différentes fonctions de conversion et stockage.

Dans ce chapitre, beaucoup de travaux de recherche sont relativement récents par rapport à ceux exposés dans les chapitres précédents. Comme certains sont actuellement en cours de réalisation, nous ne signalons que les principales avancées obtenues depuis trois ans par notre équipe. Ainsi après avoir cerné les domaines de recherche à traiter sur la problématique micro-alimentations intégrées alimentées par des micro-sources PV, nous rappelons les verrous technologiques bloquant l'intégration de ces fonctions de conversion, puis nous proposons les pistes potentielles de recherche pour les résoudre en signalant celles que nous avons choisi d'explorer, notamment sur les éléments passifs inductifs.

IV.2. Identification du domaine de recherche.

Quelle que soit l'application considérée (*ie. étage de conversion intégré pour application portable ou microsysteme*), un classement des différents besoins énergétiques est nécessaire dans un premier temps. En effet, les systèmes alimentés en très faible puissance présentent des contraintes spécifiques en tension, courant, fréquence, encombrement et température. Pour que leurs besoins énergétiques soient optimisés, la création de nouveaux composants s'est fait ressentir.

Après avoir établi une classification par type de problèmes à résoudre, nous montrons différentes pistes de recherche pouvant être suivies pour réaliser des fonctions de conversion. Pour cela, nous nous basons sur les dernières avancées des recherches effectuées sur l'intégration des convertisseurs d'énergie, servant d'étage d'adaptation entre des sources ou micro-sources d'énergie et des applications à faibles besoins énergétiques.

IV.2.1. Identification des besoins.

En électronique, la miniaturisation des composants et des fonctions permet d'embarquer des composants et des cartes électroniques remplissant des fonctions de plus en plus complexes, pour des équipements et accessoires portables de grande consommation [IV-3]. Nous pouvons citer diverses applications bénéficiant dès à présent de ces grandes avancées, tels que les téléphones cellulaires, les lecteurs MP3, les caméras. Ces composants électroniques, aujourd'hui multi-fonctionnels, peuvent par exemple cumuler la saisie et le traitement d'image, la reconnaissance vocale, les transmissions de données. Souvent issus des progrès considérables de la micro-électronique, ils font de plus en plus appel aux nouvelles technologies, développées en particulier pour les microsystemes [IV-4].

Une des premières conséquences de cette évolution est qu'un nouveau besoin en source d'énergie performante miniaturisée s'est fait ressentir depuis quelques années. Cependant, comme l'alimentation électrique n'a suscité que peu d'intérêts et d'efforts de recherche et de développement par le passé, les avancées dans ce domaine sont considérées trop lentes par rapport aux besoins à couvrir. Aujourd'hui, il est unanimement reconnu que l'intégration globale des étages de conversion constitue l'enjeu majeur à surmonter pour les prochaines générations de l'électronique portable [IV-5]. En effet, sans l'existence d'alimentations électriques et d'étages de conversion de tailles compatibles avec l'application, beaucoup de microsystemes ne seront jamais viables malgré leurs performances

intrinsèques. Pour répondre à ce critère de compacité, ces alimentations aujourd'hui plus ou moins compactes, doivent tendre vers des structures semi-intégrées, voir même, entièrement intégrées à partir de technologies hybrides.

IV.2.2. Problématique des microsystèmes.

Nous avons tout d'abord cherché à créer des alimentations spécifiques à ce type d'applications, en s'appuyant sur une collaboration interne entre l'équipe MIS et TMN [IV-5]. Pour cela, nous avons effectué une brève recherche sur les diverses sources d'énergie qui pourraient convenir à ce type d'applications. Ainsi, nous nous sommes intéressés aux traitements de ces énergies, et en particulier leur adaptation aux applications par l'intermédiaire de convertisseurs statiques d'énergie et de commandes adéquates. Ce domaine, faisant l'objet d'enjeux importants, est en perpétuelle évolution, tant en réduction des tailles des composants qu'en quantité d'énergie transférée. Cependant, un certain nombre de verrous technologiques peuvent être identifiés, empêchant d'en faire des produits fiables et commercialisables.

Ainsi, la conversion d'énergie propre aux applications de très faibles puissances comme les microsystèmes doit répondre à des contraintes très sévères en tension élevée (*plusieurs dizaines de volt*) sous très faible courant (*quelques micro Ampères*) ou alors, au contraire, des contraintes en fort courant (*quelques Ampères*) sous faible tension (*inférieure à 3V*). Les problèmes à résoudre pour créer des alimentations de ce type butent encore sur l'existence même de composants spécifiques, autant en composants actifs (*éléments de commutation*) que passifs (*éléments de stockage temporaire de l'énergie électrique*). Sur le plan mondial, les quelques réalisations publiées dans ce domaine présentent des rendements jusqu'ici faibles et sont souvent non compatibles du point de vue technologique pour cohabiter sur une même puce avec les autres éléments de conversion [IV-6, IV-7].

IV.2.2.1 Généralités sur les microsystèmes.

Le concept de microsystème ou MEMS (*Micro Electro Mechanical Systems*) est né à la fin des années 80 aux Etats-Unis, des actions conduites à l'Université de Berkeley pour intégrer sur une même puce de silicium, capteurs, traitement du signal et actionneurs. Il constitue une suite logique du progrès réalisé en microélectronique sur silicium, permettant encore la réduction des dimensions, l'augmentation de la qualité des composants et la réduction des coûts par l'emploi de procédés collectifs.

On peut ainsi, de manière compatible avec la présence des circuits intégrés réaliser des structures 3D (*membranes, cavités, poutres, etc...*), et créer ainsi des micro-dispositifs dans le but d'effectuer une action ou capter l'environnement. Depuis le début des années 90, de nombreux microsystèmes ayant des fonctionnalités très diverses ont été développés : gyroscopes, magnétomètres, microphones, micromoteurs, micropompes, *etc...* Cependant, très rapidement, ces microsystèmes se sont avérés difficiles à concevoir car ils faisaient appel à des domaines de compétences très divers dont certains n'en sont encore qu'à leur balbutiement. Ayant nécessité un temps de développement plus important à cause de leur plus grande complexité, ces microsystèmes ont eu beaucoup de difficulté à s'imposer sur le marché.

Certains microsystemes ont, par contre, connu un grand succès commercial avec un marché important. Citons l'exemple des têtes d'imprimante à jet d'encre ainsi que les têtes de lecture/écriture pour disques durs et, dans une moindre mesure, les systèmes de projection d'image [IV-8, IV-9]. D'autres applications commerciales des microsystemes sont les accéléromètres et les capteurs de pression. Nous pouvons noter une très grande diversité dans ce type de microsystemes, tant au plan des technologies de fabrication employées que des besoins énergétiques pour leurs fonctionnements (électrostatique, thermique, magnétiques, électriques ...). Historiquement, l'effort de développement de ces objets s'est porté exclusivement sur la réalisation de structures sans tenir compte des aspects commande et alimentation. Ceci limite aujourd'hui leur diffusion et leur évolution au sein de systèmes plus complexes.

IV.2.2.2 Actionnement des microsystemes.

Les microsystemes comportent très souvent des pièces mobiles qui, de part leur mise en mouvement, entraînent la réalisation d'une fonction. Pour cela, différents types d'actionnement ont été développés. Les principaux sont consignés dans le tableau 4.1. En guise d'illustration, la figure 4.1 montre le cas d'un micro-miroir à actionnement électrostatique, développé en partenariat entre la société Tronic's Microsystems de Grenoble et le LAAS-CNRS.

Mode D'actionnement	Force Pression	Fréquence	Tension Courant	Puissance
Electrostatique	$P \propto 2\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \left(\frac{V}{e}\right)^2$	0,1-50kHz	30-1500 V < 1 μ A	Le mW
Magnétique	$F \propto \mu_0 \cdot Bi$	0,1-50kHz	< 1 V 50 mA	Le W
Thermique	$P \propto (\gamma_1 - \gamma_2)$	0,01-1kHz	10 V 10 mA	0,1 W env.
Piézo-électrique	$P \propto V$	0,05-30kHz	1V < mA	Le mW

Tableau 4.1. Comparaison des différents types d'actionnements.

Les actionneurs électrostatiques sont couramment utilisés pour la mise en mouvement de membranes ou de poutres. Ils bénéficient de forces de rappel mécaniques venant contrebalancer les forces électrostatiques : les électrodes s'attirent alors et se rapprochent, quelle que soit la polarité des tensions appliquées aux électrodes.

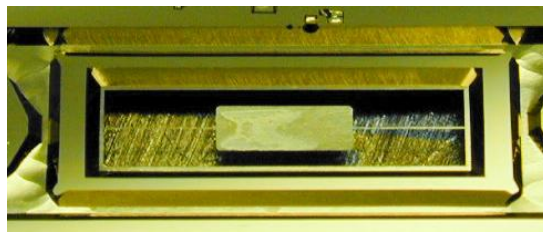


Figure 4.1. Micro-miroir à actionnement électrostatique [IV-8].

Comme l'énergie stockée est directement proportionnelle à la capacité C de l'actionneur, elle est inversement proportionnelle à la distance entre les deux électrodes. Ce type d'actionnement est destiné à des actionnements de pièces les plus rapprochées possibles [IV-9, IV-10].

L'actionnement magnétique, en opposition à l'actionnement électrostatique, peut générer des forces attractives et répulsives. Il présente l'avantage d'être sans fil et sans contact physique, en particulier dans le cas de la magnétostriction et présente la possibilité d'être intégré dans un packaging sous vide.

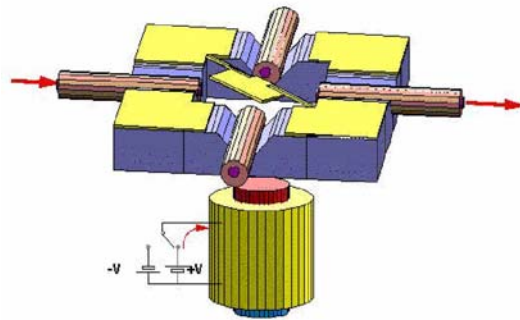


Figure 4.2. Micro-miroir à actionnement magnétique [IV-11].

Mais l'inconvénient principal du mode magnétique réside en l'obligation d'appliquer un champ magnétique externe par l'intermédiaire d'un aimant permanent, nuisant ainsi à la miniaturisation. De plus, dans le cas de la magnétostriction, des dépôts de couches magnétiques sont nécessaires. Ces solutions font appel à de nouveaux matériaux [IV-12], pour lesquels il faut développer des solutions d'élaboration de couches minces par des procédés compatibles avec les micro-technologies ainsi que des méthodes pour caractériser ces dernières.

L'actionnement thermique permet, quant à lui, une intégration monolithique du système. En effet, des couches de silicium, polysilicium, oxyde de silicium et de métal suffisent pour constituer la partie mobile. Mais il présente des temps de réponse importants dus à l'importante inertie thermique et une forte consommation d'énergie. De plus, un vieillissement accéléré, dû à l'échauffement, entraîne une dérive progressive des lois de commande dans le temps [IV-13].

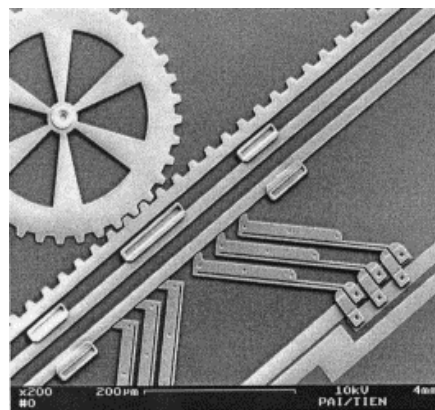


Figure 4.3. Détail d'un actionnement thermique [IV-13].

L'actionnement piézoélectrique offre la possibilité d'atteindre des déplacements importants avec de faibles tensions d'actionnement et une grande résolution [IV-14]. Mais, le vieillissement et le phénomène de fatigue mécanique de telles couches ne sont pas encore bien maîtrisés.

IV.3 Problématique de l'intégration de puissance.

Dans le domaine de l'électronique de puissance, l'intégration des diverses fonctions de base présentes dans un convertisseur statique représente aujourd'hui une des préoccupations majeures du domaine de la conversion d'énergie. Le besoin toujours croissant de densité de puissance est motivé par le développement d'architectures et d'alimentations distribuées pour la production et la conversion de l'énergie, en particulier dans les systèmes embarqués.

Cette migration vers le «*System-On-Chip*» sur une même puce ou bien plus probablement à court terme, le «*System on Package*» (*basé sur des technologies d'assemblages 3D*) impose des progrès indispensables pour continuer à réduire les tailles des convertisseurs actuels et atteindre ainsi des densités de puissance associées à des rendements toujours plus élevés. En effet, malgré des progrès constants dans ce domaine, il reste encore un grand nombre de verrous technologiques à résoudre pour obtenir des alimentations performantes occupant des places réduites.

IV.3.1. Sources d'énergie [IV-14].

Pour les systèmes portatifs, trois gammes de puissance correspondent à la plupart des applications. Nous pouvons ainsi effectuer une classification qui correspond à trois gammes :

- **La gamme « Subwatt »**, correspondant à une puissance d'environ 100mW et couvrant les besoins en alimentation de micro-capteurs ou de systèmes sur puce,
- **La gamme du Watt**, correspondant à une puissance de 1 à 5W, permettant d'équiper la téléphonie cellulaire, les PDAs et la lecture audio,
- **La gamme de la dizaine de Watts**, comprise entre 15 et 20W, permettant d'alimenter les ordinateurs portables.

Le terme portable pour une application définit en fait un mode d'utilisation de l'énergie électrique en autonomie complète par rapport à un réseau électrique. Ceci peut par exemple s'appliquer aisément à un accumulateur ou une batterie, pouvant être utilisés dans n'importe quelle orientation. Par contre, ceci impose des contraintes de masses et de dimensions relativement réduites du système de stockage énergétique ainsi qu'une complète étanchéité. Nous nous sommes intéressés aux batteries réversibles (*pouvant être rechargées*) les plus communément utilisées dans les applications portables, qui semblent les mieux adaptées.

Actuellement, un accumulateur désigne un système physico-chimique capable de convertir de façon réversible l'énergie électrique en énergie chimique. L'énergie électrique est donc accumulée sous forme électrochimique et peut être restituée, selon les besoins, au rendement de conversion près. L'accumulateur n'est généralement pas utilisé seul, mais associé avec d'autres pour constituer une batterie de tension donnée compatible avec l'application comme nous avons vu en fin du chapitre précédent.

IV.3.2. Etage de conversion.

Qu'elle soit la source d'énergie, il est rare que cette dernière puisse délivrer directement les tensions requises par l'application qu'elle alimente. Une électronique de puissance d'interface est alors indispensable. Sa structure et ses composants doivent être choisis en adéquation avec les particularités du contexte.

Les convertisseurs statiques basés sur des composants en commutation sont maintenant bien connus et universellement utilisés à des niveaux de puissance très variables. Ils ont progressivement remplacé les systèmes linéaires qui présentaient des rendements limités à 50% maximum, du fait des polarisations des transistors. Dans les applications visées, ces convertisseurs sont très rarement utilisés dans des versions isolées (*avec transformateur*). En effet, l'isolement de sécurité n'est pas forcément justifié à ces niveaux de puissance et le besoin d'une adaptation d'impédance dans de grandes proportions se fait rarement sentir.

Pour illustrer la propriété des systèmes à découpage, considérons des structures simples, couramment utilisées pour la conversion continue-continue (*figure 4.4*). La structure abaisseur (*figure 4.4a*) permet d'obtenir une tension régulée inférieure à celle de la source. Par opposition, la structure élévatrice (*figure 4.4b*) permet d'obtenir une tension de sortie plus élevée. Les deux structures des figures 4.4c et 4.4d permettent d'adapter la tension de sortie en fonction des besoins de l'application, mais présentent des rendements de conversion plus faibles que les deux premières. Dans un contexte d'alimentation pour microsystèmes, la structure de conversion de la figure 4.4a peut par exemple assurer la fourniture d'une tension inférieure à 10V alors que les structures 4.4b et 4.4d peuvent assurer la fourniture d'une tension plus élevée (*de l'ordre de 100V*).

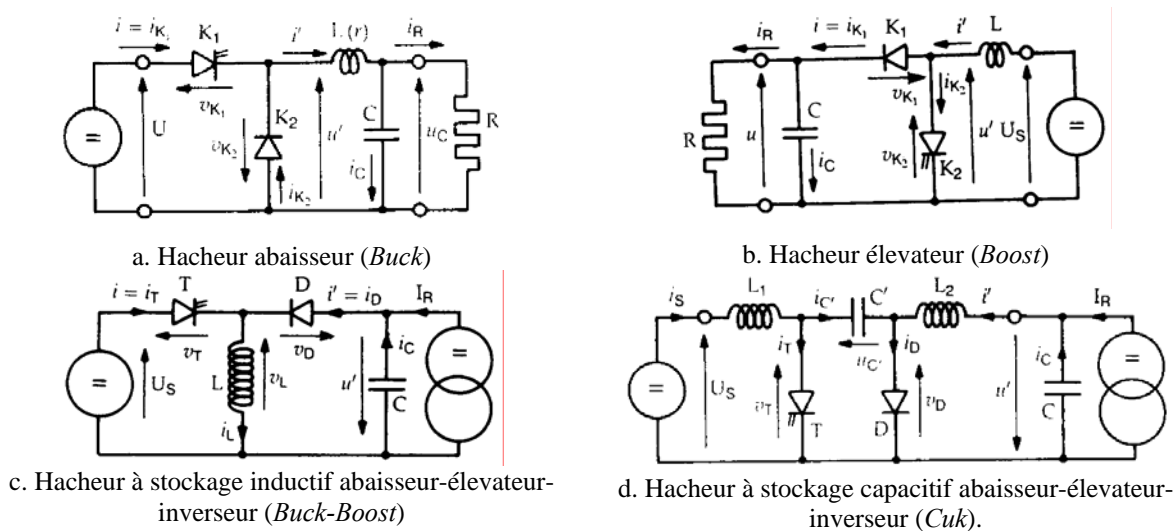


Figure 4.4. Structures de base de convertisseurs à découpage non-isolés [IV-15].

Les topologies présentées figure 4.4 utilisent le même couple «composant actif-diode», connecté différemment en fonction des propriétés de conversion recherchées. Pour atteindre des rendements de conversion élevés, les composants actifs utilisés doivent présenter de faibles chutes de tension à l'état passant ainsi que de faibles capacités parasites, relativement à la puissance à convertir.

Les bonnes performances des structures basées sur le découpage sont très liées à celles des filtres constitués de composants passifs *L* et *C*. Ces derniers sont dimensionnés pour «lisser» les tensions et les courants découpés et pour éliminer les harmoniques indésirables. Le découpage devient le système le plus répandu pour les systèmes d'adaptation d'énergie électrique car il présente une grande souplesse d'utilisation, de nombreuses possibilités de pilotages et des rendements de conversion élevés. Il reste relativement coûteux et volumineux du fait de la présence de ces filtres que beaucoup d'équipes de recherche cherchent à concevoir en version intégré.

Globalement, la plupart des convertisseurs statiques existants aujourd’hui basent leurs performances sur les propriétés des divers composants discrets présents dans leur structure. Rien n’est moins certain que ces structures puissent être transposables dans des versions intégrées. En particulier, les composants passifs présents dans ces montages, utilisés pour stocker de l’énergie à l’échelle de la commutation, n’ont actuellement pas les mêmes propriétés en discret et en intégré. Leurs dimensionnements se font principalement par rapport aux fréquences de travail des structures. Leurs valeurs sont généralement faibles, de l’ordre de quelques micro-henrys et quelques micro-farads.

Cependant, ces valeurs n’ont pas encore été atteintes par des composants intégrés. Pris Tel quel, le rendement de conversion risque d’être fortement détérioré, à cause notamment des valeurs parasites des composants de stockage nécessaires réalisés en intégré. D’importants efforts de recherche doivent être accomplis pour développer de nouveaux composants passifs intégrés présentant de bonnes performances, mais d’autres doivent se concentrer sur la création de nouvelles structures de conversion et de commandes se basant sur les propriétés des composants intégrés [IV-16, IV-17].

IV.3.3. Aperçu des dernières avancées des systèmes de conversion intégrés.

IV.3.3.1. Les composants actifs.

En intégration de puissance, les points les mieux maîtrisés concernent les semi-conducteurs, bénéficiant de connaissances et de travaux de recherche très avancés aujourd’hui [IV-18]. En effet, l’amélioration des performances de ces composants à base de semi-conducteurs est telle qu’il est désormais possible, par le contrôle de leur état, de piloter le transfert de puissances électriques de gammes et de formes diverses. Les composants actifs sont de plus en plus faciles à commander avec des circuits simples, peu coûteux, totalement intégrables et présentant des consommations quasi-négligeables. Ils présentent de faibles pertes en conduction et en commutation et ont une grande partie des circuits électroniques annexes (*circuit rapproché de commande, CALC, sécurité contre les sur-tensions, les sur-intensités*), garantissant leur bon fonctionnement, qui co-existent sur la même puce que le composant de puissance.

Evolution des volumes des convertisseurs de puissance et de leur fréquence de commutation

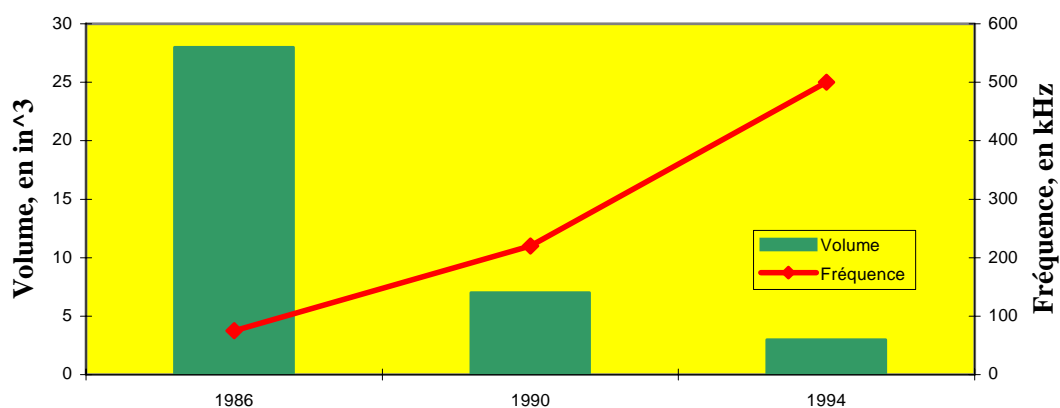


Figure 4.5. Evolution des volumes des convertisseurs de puissance et de leur fréquence de commutation [IV-17].

Sur une vingtaine d'années, la maîtrise des technologies de conception et de fabrication de ces composants est telle qu'elle a permis une augmentation progressive des fréquences de commutation de 75kHz jusqu'au Méga Hertz. Cette montée en fréquence a d'ores et déjà permis une réduction des tailles de tous les éléments composant un convertisseur statique (*figure 4.5*). En particulier, les tailles des éléments de stockage et de filtrage ont fortement diminué car les valeurs mêmes des composants nécessaires à un bon filtrage diminuaient. En parallèle, une réduction de consommation a pu être constatée par l'élimination des connexions et la simplification des circuits de commande, augmentant d'autant le rendement de conversion de l'ensemble.

Dans le domaine des faibles puissances (*inférieures à 100W*), le transistor MOSFET règne en maître comme composant actif commandable à l'amorçage et au blocage. En effet, sa grille peut présenter un faible niveau de seuil de déclenchement et donc être alimentée par de très faibles tensions. Par une optimisation de ses capacités parasites, sa partie commande présente un minimum d'énergie perdue difficile à obtenir avec d'autres familles de composants actifs. Il tend même à remplacer, dans certains cas comme les redresseurs synchrones de très faible tension, les diodes Schottky. Cependant, les performances des diodes sont constamment en cours d'amélioration pour pouvoir présenter des performances en commutation comparables aux composants actifs tout en limitant leurs pertes. Pour les alimentations des applications portables (*ordinateurs, téléphones, ASICs...*), nécessitant désormais de très faibles tensions pour les versions futures (*< au volt*), une nouvelle famille de composants actifs doit être entièrement créée. Il faut donc concevoir pour cela de nouveaux composants optimisés basse tension et fort courant, allant jusqu'à plusieurs dizaines d'ampères.

Dans la gamme opposée, les préoccupations tournent autour d'une montée de la tenue en tension pour des fortes puissances (*> au MégaWatt*), tout en continuant à repousser les limites des fréquences de commutation. Les recherches se poursuivent actuellement vers l'intégration de fonctions autour du composant actif, avec toujours plus de sécurités et de performances, continuant en cela les efforts déjà accomplis notamment par le LAAS-CNRS depuis de nombreuses années [IV-18].

En résumé, l'effort sur les composants actifs doit être poursuivi pour adapter ces derniers aux nouvelles gammes de tension, courant, fréquence et encombrement, très particuliers aux applications embarquées et les microsystèmes. En revanche, concernant l'intégration des composants réactifs, ce secteur n'a pas subi la même évolution. En effet, il est difficile d'obtenir des composants capables de supporter de fortes contraintes courant-tension, avec des valeurs d'inductances et de capacités importantes. Ces valeurs imposent aujourd'hui le recours à la mise en œuvre de nouveaux matériaux magnétiques et diélectriques, pour continuer à augmenter les densités de puissance. Nous citons quelques réalisations actuellement prometteuses sur le plan recherche pour résoudre ces verrous technologiques.

IV.3.3.2. Cas des condensateurs.

Quelle que soit la technologie de réalisation développée (*accumulateurs électrochimiques, films minces à base d'oxynitride, de céramique ou de polymère*), la structure fondamentale d'un condensateur reste inchangée. Elle est constituée d'une couche de diélectrique prise en sandwich entre deux couches conductrices. La valeur capacitive d'un condensateur est alors proportionnelle à la surface de ses armatures et à la constante diélectrique de l'isolant. En revanche, elle est inversement

proportionnelle à l'épaisseur de l'isolant. C'est principalement sur ce dernier facteur que l'on jouait depuis des années pour obtenir des condensateurs compacts à forte valeur capacitive. Aujourd'hui, étant données les faibles dimensions atteintes, une demande de capacité élevée ne peut plus être obtenue en continuant à diminuer l'épaisseur de l'isolant, qui a atteint sa limite d'intégration. En effet, sa réduction par rapport aux tailles actuelles entraîne une diminution trop importante du champ électrique critique, une augmentation du courant de fuite et peut également affecter la constante diélectrique.

Une solution, développée au LAAS-CNRS, a consisté à augmenter la surface des armatures. Elle consiste à adopter une topologie dite de tranchées (*figure 4.6*). Pour la réalisation technologique de telles armatures, la technique de gravure profonde du silicium a été mise au point.

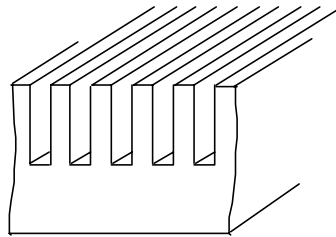


Figure 4.6. Topologie en tranchées d'un condensateur intégré [IV-18].

L'intérêt d'une telle topologie est que le rapport entre la surface effective (*réelle*) et la surface apparente (*de la puce*) peut être relativement élevé. Il dépend directement de la profondeur de gravure et de la distance inter-tranchées. Il en résulte un accroissement important de la capacité par unité de surface apparente. Ces condensateurs présentent des capacités variables en fonction des tensions qu'ils supportent.

Ce comportement non linéaire a été exploité en électronique de puissance dans la réalisation de circuits annexes nommés CALC (*Circuits d'Aides à la Commutation*), dans le but d'améliorer considérablement les commutations des interrupteurs de puissance. En effet, dans les mêmes conditions de fonctionnement, un condensateur non-linéaire stocke lors d'une commutation au blocage moins d'énergie que son homologue à capacité constante. C'est d'autant moins d'énergie à restituer lors de la commutation à l'amorçage. Cette caractéristique lui permet d'effectuer un compromis intéressant entre une diminution des pertes en commutation et l'obtention de temps de commutation rapides.

La connaissance de ces topologies intégrées est telle que la non-linéarité de leur caractéristique $C(V)$ peut être réglée ainsi que les valeurs de capacité et de tenue en tension en fonction de l'application envisagée. Ainsi, des associations P⁺N/MOS permettent de réaliser des condensateurs fortement non linéaires, à tenue en tension compatibles avec les interrupteurs de puissance qu'ils doivent aider à commuter. Ces dispositifs se basent sur le contrôle de l'extension de zones de charge d'espace (*ZCE*) de jonctions P⁺N convenablement disposées par l'application d'une tension inverse, à partir d'une tension V_0 , et l'accès à une capacité de constante C_0 dite de déplétion garantissant la capacité minimale à forte tension. Une décroissance brutale de la valeur de la capacité totale apparaît à partir d'une valeur de tension, définie par le dopage et la distance entre tranchées. La réalisation des premiers dispositifs de test au LAAS-CNRS, basés sur des techniques de gravure profonde du silicium

et sur le dépôt de silicium poly-cristallin dopé, a permis de valider les simulations 2D et de vérifier la variation de capacité en fonction de la tension.

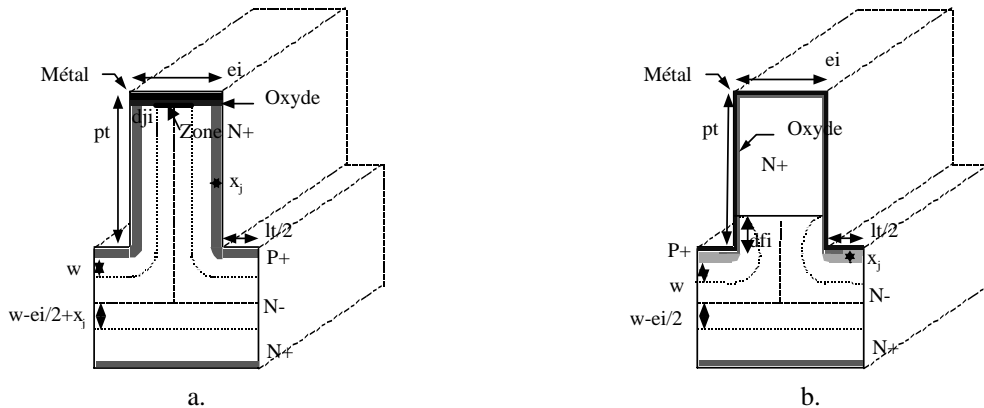


Figure 4.7. Cellules capacitives élémentaires[IV-18].

Aujourd'hui, les technologies de fabrication des topologies en «tranchées» s'orientent vers la conception de condensateurs à capacité constante de quelques microfarads, sous très basse tension. Ces technologies sont prometteuses pour répondre aux besoins de filtrage des alimentations pour micro-convertisseurs [IV-18].

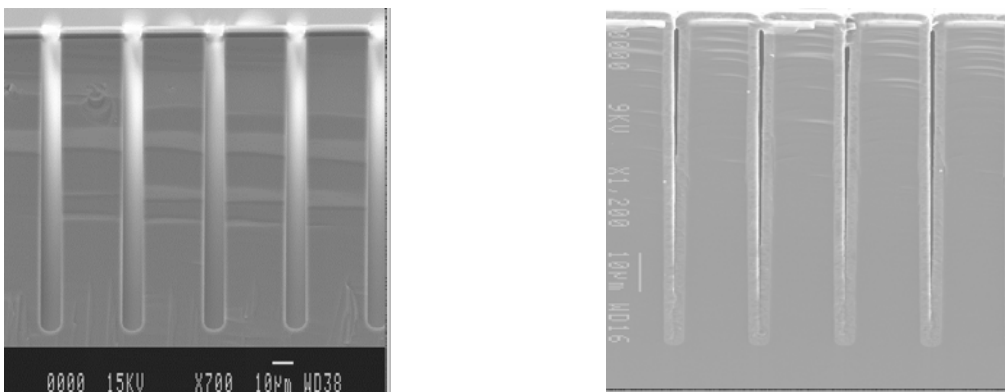


Figure 4.8. Vue en coupe des tranchées avec dépôt de polysilicium.

Une autre voie de recherche consiste à remplacer les diélectriques classiquement utilisés en micro-électronique (SiO_2 , Si_3N_4) par des oxydes ferro-électriques (PZT , SBT , BST), présentant une constante diélectrique importante ($500 < \epsilon < 1500$). Le but est d'obtenir des capacités surfaciques de plusieurs dizaines de nF/mm^2 . Pour atteindre ces performances, il est nécessaire de mettre au point de nouvelles méthodes de dépôts.

IV.3.3.3. Cas des inductances.

L'intégration d'une inductance sur silicium a d'abord été envisagée pour des applications autres que le stockage énergétique comme les micro-actionneurs, les micro-capteurs ou encore les inductances de filtrage pour la RF. L'objectif était qu'elles puissent assurer la fonction d'inductance à une fréquence de travail élevée, typiquement dans des circuits RF. La plupart des structures fabriquées et commercialisées aujourd'hui travaillent donc à très hautes fréquences.

Jusqu'à aujourd'hui, des difficultés de réalisation technologique n'ont pas permis d'atteindre des valeurs d'inductances intégrées supérieures à la centaine de nanohenry. De plus, elles présentent l'inconvénient majeur d'avoir une résistance série très forte ($> 10 \Omega$) par rapport à leur équivalent en discret (*quelques mΩ*), ce qui détériore considérablement le rendement d'un système de conversion lorsqu'il fait appel à de tels composants.

Il y a 5 ans environ, le concept d'alimentations «On-Chip» a fait à nouveau ressortir le besoin de mettre au point des inductances devant stocker de l'énergie et la restituer dans des structures totalement intégrées. Ces besoins étaient principalement dictés par des raisons d'encombrement (*domaine spatial, médical, télécoms*). Les premières applications qui ont abouti à des réalisations commerciales ont eu pour débouchés des inductances pour stockage de données sur disques magnétiques. En effet, les techniques actuelles de fabrication des microsystèmes (*ie. Dépôt, gravure, etc...*) permettent de réaliser, avec une grande précision de fabrication, les fils conducteurs ainsi que le noyau magnétique de la bobine. Cependant, malgré une augmentation progressive des valeurs des inductances, la résistance série, toujours forte, limite encore son utilisation pour la conversion d'énergie. Nous rappelons ici les trois types de géométrie les plus utilisées pour réaliser des inductances intégrées : les spirales, les solénoïdales et les toroïdales.

- Les inductances solénoïdes.

Les inductances réalisées en discret et classiquement utilisées en stockage d'énergie à l'échelle d'une commutation possèdent en grande majorité une forme solénoïdale. Leur fabrication est aisée puisque le fil conducteur peut être rapidement enroulé autour du tore magnétique. Mais cet empilement tri-dimensionnel est difficilement transposable aux faibles dimensions. Toutefois, certaines réalisations compactes s'inspirent de la forme d'origine et font appel à des techniques de micro-usinage et de dépôt mises au point dans le cadre des microtechnologies, pour réaliser des inductances intégrées hybrides. Sur ce principe, il existe des solutions hybrides où les fils conducteurs sont enroulés manuellement autour d'une couche magnétique ou bien des solutions intégrées où les fils conducteurs sont constitués de cuivre déposé en plusieurs étapes sur un film à matériau magnétique. L'avantage de ces solutions compactes est qu'elles assurent un faible flux de fuite et donc une minimisation des interférences électromagnétiques.

- Les inductances à structure « mixte » [IV-19].

Ce type de bobines (*figure 4.9*) est basé sur un empilement de trois couches de matériaux. Leur réalisation reste assez délicate d'un point de vue technologique, du fait de la nécessité de réaliser des plots entre les niveaux inférieur et supérieur. Un nouveau type de structure dite mixte a été développé par le LAAS-CNRS. Elle ne fait appel qu'à deux niveaux, un pour le conducteur et un pour le noyau magnétique, limitant ainsi le nombre de masques nécessaires à sa fabrication (*figure 4.10*).



Figure 4.9. Bobines de type a. "toroïdal" - b. "serpentin".

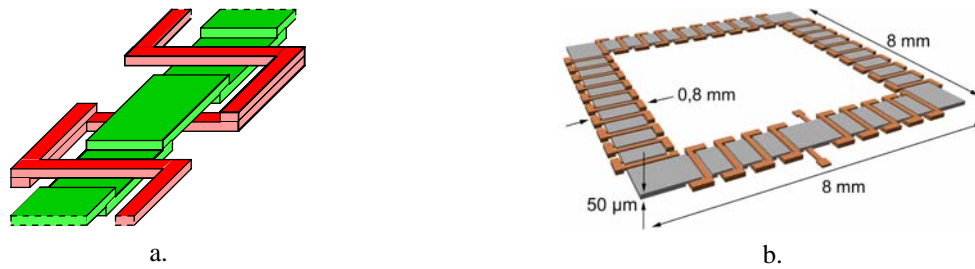


Figure 4.10. Structure de type "mixte". a. Principe – b. Géométrie de la bobine.

Si cette géométrie simplifie la réalisation, elle ne correspond pas à une solution optimale en terme d'encombrement. En effet, avec les dimensions du circuit magnétique reportées sur la figure 4.10b, le volume du matériau magnétique est approximativement de $1,2 \text{ mm}^3$ de plus. Ce volume est encore augmenté par le feuilletage du circuit magnétique pour les applications hautes fréquences. Si l'on considère un foisonnement d'environ 50% entre le NiFe et la résine, le volume global du circuit magnétique feuilleté est multiplié par 2. D'autre part, la solution qui consiste à diminuer μ_r est toute aussi pénalisante. En effet, si l'on veut conserver la même valeur d'inductance, il faudra augmenter le nombre de spires, et la résistance série du bobinage sera accrue. Cette structure peut toutefois trouver sa place dans des dispositifs ne nécessitant pas un stockage important d'énergie, comme pour les transformateurs. Un exemple des premières réalisations effectuées au LAAS-CNRS est donné en figure 4.11.

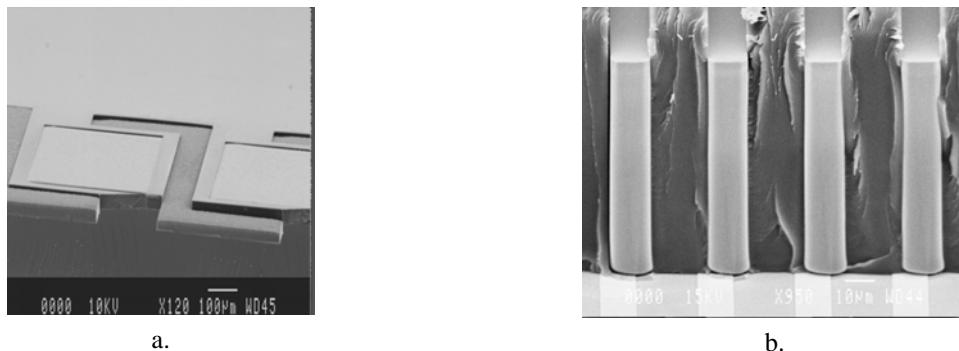
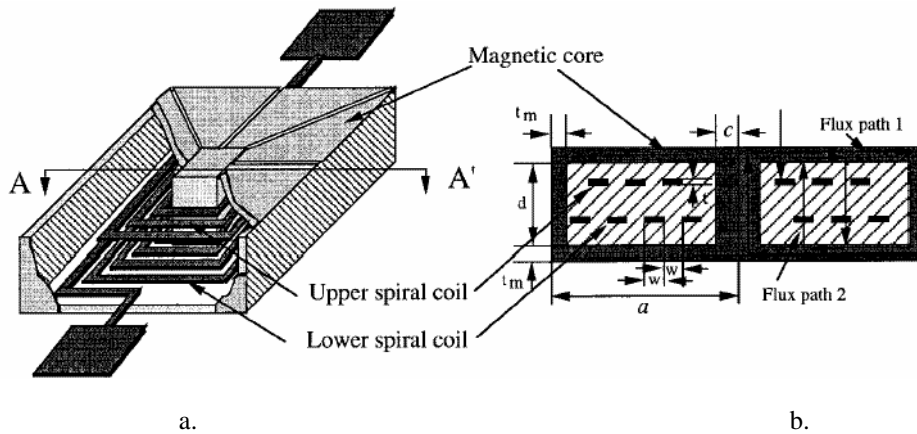


Figure 4.11. Photographies réalisées à l'aide du Microscope électronique à balayage (MEB) des premiers dépôts de matériaux réalisés au LAAS-CNRS [IV-19].

- Les inductances spirales [IV-20].

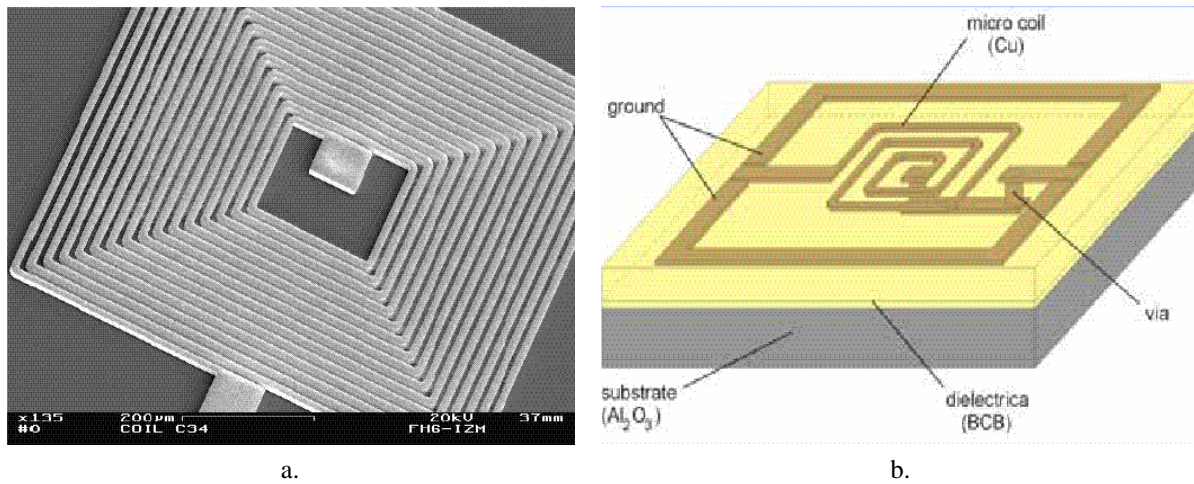
La plupart des inductances intégrées que l'on trouve dans la littérature possèdent une forme spirale. Elles sont réalisées soit sur un substrat isolant, soit un substrat magnétique ou bien entre deux couches de matériaux magnétiques. Du fait des caractéristiques géométriques de la spirale, le flux magnétique possède deux composantes : une, parallèle à la surface du wafer et l'autre, perpendiculaire.

De plus, il est difficile pour ce type de structure de fermer le circuit magnétique pour canaliser le flux. En effet, la couche magnétique doit traverser la surface du substrat pour qu'elle soit efficace. Sinon, des fuites magnétiques très importantes existent et rendent cette couche inutile.



a. Figure 4.12. Inductance planaire spirale [IV_20].
 a. Spirale incluse dans le circuit magnétique – b. Modèle de simulation

Une solution actuelle permettant la fabrication de l'équivalent d'un tore magnétique autour d'une spire consiste à déposer successivement une couche de matériau magnétique, l'inductance puis une nouvelle couche de matériau magnétique, et enfin de refermer le tore (figure 4.12). Cette méthode de fabrication de tores n'est pas optimisée pour des applications d'actionnement, car ils ne permettent pas un flux magnétique important.



a. Figure 4.13. Exemples d'inductances spirales intégrées.

Pour des applications de stockage d'énergie, deux facteurs limitent l'amélioration des performances des inductances spirales. D'une part, le circuit magnétique doit être complété d'une couche métallique, afin de diminuer la réluctance magnétique et ainsi les lignes de champs parasites. D'autre part, la spire conductrice doit posséder une résistance la plus faible possible, pour réduire les pertes Joule du conducteur.

Une des solutions utilisées actuellement consiste à encapsuler la bobine dans un tore magnétique réalisé en fer-nickel. Mais les techniques de dépôt de ce genre de matériau sont encore à améliorer, pour obtenir par exemple une bonne reproductibilité d'un processus de fabrication à l'autre.



Figure 4.14. Exemples d'inductances spirales réalisées à l'aide des nanotechnologies [IV-21].

Une solution technologique permettant de réaliser des inductances sur silicium passe par l'utilisation des technologies de micro-usinage de surface et de volume des microsystèmes. Les applications visées sont nombreuses : micro-actionneur ou micro-capteur, convertisseur de puissance intégré ou encore inductance de filtrage pour la RF. Mais, du fait des difficultés de réalisation technologique, de faibles valeurs d'inductances ont été atteintes jusqu'à ce jour, typiquement de l'ordre de la centaine de nano Henry. De ce fait, les diverses inductances réalisées jusqu'à présent ne sont pas conçues pour leur capacité de stockage d'énergie, mais pour leur fréquence de travail élevée.

IV.3.4. Synthèse des verrous technologiques.

Malgré des avancées régulières en intégration de puissance, l'état de l'art sur les différentes fonctions intégrées montre qu'il n'est toujours pas possible de concevoir des chaînes de conversion d'énergie électrique entièrement intégrées, même à des puissances relativement faibles avoisinant le watt. Nous estimons cependant que cette voie de recherche est prometteuse sur le long terme.

L'intégration des éléments passifs a toujours été le point le plus bloquant. L'obtention de bonnes performances de ces éléments en rendement de conversion (*faibles pertes*), en tenue des performances à haute température ou en fréquence de fonctionnement est nécessaire pour envisager une intégration complète des différentes fonctions présentes dans les convertisseurs de puissance, sans en dégrader les performances. On peut donc espérer à terme, grâce à l'emploi des microtechnologies, l'intégration sur une même puce des fonctions capteurs, traitement du signal et actionneurs.

IV.4 Travaux sur la réalisation d'éléments inductifs.

Les travaux que nous avons accomplis dans ce domaine ont débuté en 2000 au sein de l'équipe TMN du LAAS-CNRS, dans le cadre de l'obtention d'une année de délégation CNRS pour reconversion thématique. Tout d'abord, des travaux de modélisation et de simulation ont été effectués, afin de mettre au point une méthodologie d'aide à la réalisation de ce type d'objets. Ces premiers travaux ont été validés par comparaison avec des données expérimentales issues de la littérature. Une fois les outils de simulation validés sur des objets simples, nous avons développé une nouvelle filière technologique permettant la réalisation de ces objets aux dimensions préconisées par les premiers résultats de simulations, correspondant aux critères de rendement, encombrement et valeurs que nous nous étions fixés ($1\mu H$).

IV.4.1 Modélisation de l'inductance.

Du fait de la facilité de leur réalisation et de la présence de résultats expérimentaux dans la littérature, nous avons axé nos études sur la réalisation d'inductances planaires. Nous présentons dans cette partie les différents critères de dimensionnement de ces inductances que nous nous sommes fixés. En effet, le dimensionnement d'une telle inductance et particulièrement sa valeur, dépend de plusieurs facteurs géométriques et technologiques.

- **Les paramètres géométriques :** Une bobine plane est géométriquement décrite par cinq paramètres (*figure 4.15*) sur lesquels il est possible de jouer pour fixer la valeur de l'inductance. Nous pouvons ainsi modifier la largeur, w , et l'épaisseur des conducteurs, t , leur espacement s mais aussi le nombre de tours, N . Son diamètre extérieur, d_{out} , doit être choisi afin d'optimiser le rapport entre la valeur d'inductance et la surface occupée sur le circuit.

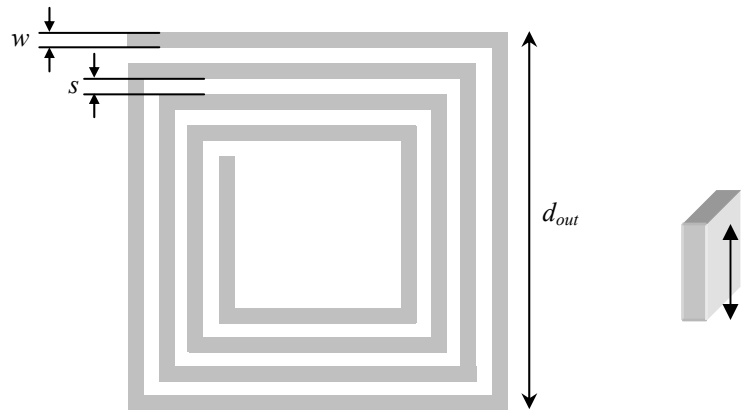


Figure 4.15. Inductance planaire rectangulaire : conventions prises.

- **La topologie du bobinage :** Nous avons remarqué dans la littérature que différentes formes géométriques (*carrée, octogonale, hexagonale et circulaire*) apparaissent sans aucune justification quant à leur choix. Nous avons donc comparé les performances de ces dernières afin d'évaluer la structure la plus adaptée au stockage de l'énergie. L'étude bibliographique montre que dans le domaine RF, une inductance planaire circulaire est la plus indiquée car elle présente de meilleures performances du point de vue du facteur de qualité [4.7-4.12].
- **Comportement électro-thermique :** D'autres considérations sont à prendre en compte comme la densité de courant qu'il est possible de faire passer dans un conducteur de section donnée (4.1). Cette densité peut être estimée par l'équation suivante :

$$J = k \cdot \frac{I_{max}}{S} \quad (4.1)$$

avec J représentant la densité de courant, I_{max} le courant maximum, S la section du conducteur et k un coefficient dépendant de la forme du signal passant dans le conducteur.

Il est également nécessaire d'étudier l'élévation de température que le passage du courant induit. En effet, cette étude permet d'évaluer si l'échauffement ne provoque pas la destruction de la bobine par fusion des conducteurs. Pour minimiser ces effets, il est nécessaire de travailler sur deux aspects à la fois :

- sur la densité de courant maximum qu'il est possible de faire passer dans une structure donnée (*en A/m²*),
- sur la section du conducteur mais aussi la topologie de la bobine (*carré, octogonale, hexagonale ou circulaire*), afin que la structure présente le moins de contraintes au passage du courant possibles.

Un pré-dimensionnement de l'inductance peut s'effectuer en jouant sur cinq paramètres géométriques. Pour évaluer l'influence de ces derniers sur la valeur d'une inductance carrée, nous avons développé des modules de calculs sous Matlab, basés sur l'expression analytique développée par Grover [4-13, 4-15]. Cet algorithme est fondé sur les lois de Maxwell. Il permet de calculer l'inductance totale L_T d'un bobinage planaire rectangulaire à partir de l'inductance propre L_C , des inductances propres créées par chacun des i brins du bobinage, ainsi que des mutuelles inductances M_i entre deux conducteurs adjacents (4.2) :

$$L_T = L_C + \sum_i M_i \quad (4.2)$$

La validité des résultats obtenus a été établie en les comparant avec ceux obtenus avec un logiciel de simulation dédié microsystemes, COVENTOR, utilisant une méthode de résolution aux éléments finis [IV-24]. Des exemples de comparaison de résultats obtenus sont données dans les figures 4.16 et 4.17, pour le comportement inductif, respectivement en fonction du nombre de tours et en fonction de la largeur du conducteur.

L'ensemble de ces travaux ont fait l'objet de plusieurs encadrements de stages. Cette démarche a permis de bien connaître l'influence des 5 paramètres géométriques définissant une bobine planaire sur sa valeur inductive de l'objet mais aussi sur sa partie résistive. De même, les influences sur la fréquence de résonance et le facteur de qualité ont été étudiés.

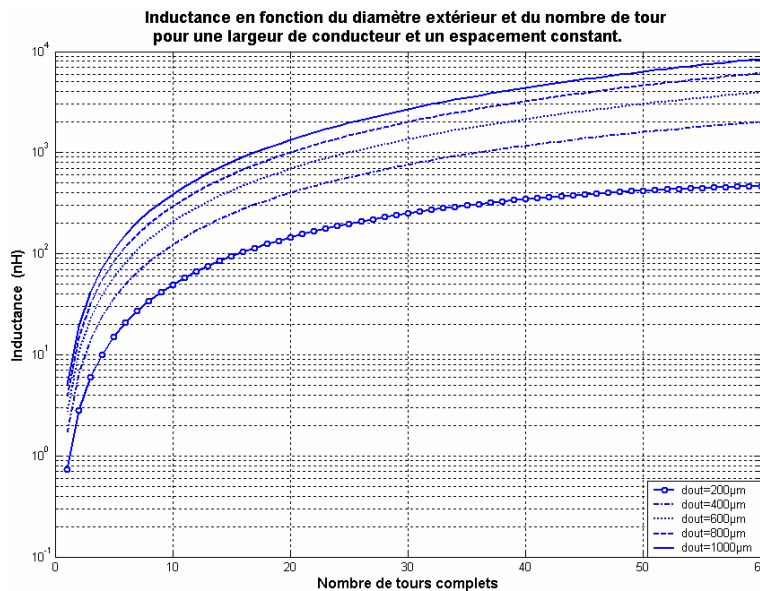


Figure 4.16. Evaluation de l'inductance en fonction du diamètre extérieur et du nombre de tour pour une largeur de conducteur et un espacement constant.

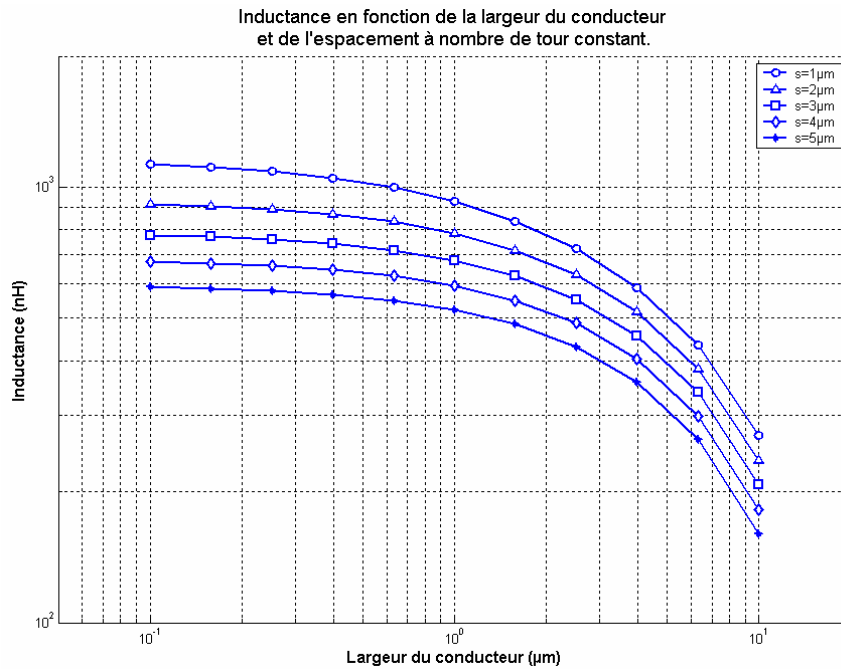


Figure 4.17. Evaluation de l'inductance en fonction de la largeur du conducteur et de l'espacement à nombre de tour constant.

En résumé, nous pouvons déduire que :

- L'augmentation du diamètre extérieur et du nombre de tours ont pour conséquence une augmentation de la valeur de l'inductance mais aussi de la résistance de conduction associée, les diminutions de la fréquence de résonance et du facteur de qualité.
- La diminution de la largeur des conducteurs et de leur espacement provoque une augmentation de l'inductance ainsi que de la fréquence de résonance et du facteur de qualité. En outre, la diminution de la largeur des conducteurs provoque l'augmentation de la résistance série conformément à la relation 4.3.
- La diminution de l'espacement entraîne une augmentation de l'inductance. Les couplages capacitifs deviennent plus importants et diminuent la fréquence de résonance. L'espacement n'a pas de répercussions sur la résistance série ni sur le facteur de qualité.
- L'épaississement des conducteurs n'agit que sur la résistance série qui diminue (4.3), impliquant alors une augmentation du facteur de qualité.

Les différentes simulations réalisées ont permis d'extraire des jeux de dimensions, comme : $d_{out}=700\mu\text{m}$, $w=0.3\mu\text{m}$, $s=1\mu\text{m}$, $t=3\mu\text{m}$ et $N=23$ tours. Ce jeu nous a servi de base pour la réalisation d'inductances intégrées. Il reste à présent à connaître le comportement électrique d'une telle structure afin de conclure sur ses performances.

IV.4.2. Influence de la forme de l'inductance sur les propriétés électriques.

Beaucoup d'études ont été menées pour faciliter le travail des designers, en leur fournissant des algorithmes de calcul et d'optimisation d'inductance. La méthode de Grover en est un exemple [4.13, 4.14, 4.16]. Cette expression est très précise et rapide mais n'est valable que pour les inductances rectangulaires et carrées.

Une autre approche est utilisée dans la littérature en approximant les conducteurs par des couches symétriques de courants, reflétant la répartition des densités de courant. Cette expression, appelée Current sheet approximation, permet de calculer l'inductance de bobines carrées, hexagonales, octogonales et circulaires [4.12]. Comme précédemment, une forme donnée d'inductance planaire sera décrite par le nombre de tours N , la largeur des conducteurs w , leur espacement s et un des diamètres suivants : le diamètre extérieur d_{out} , le diamètre intérieur d_{in} , le diamètre moyen d_{avg} ou le taux de remplissage moyen ρ d'une bobine (4.4). on pourra s'aider des formules suivantes :

$$d_{avg} = 0,5 \cdot (d_{out} - d_{in}) \tag{4.3}$$

$$\rho = \frac{d_{out} - d_{in}}{d_{out} + d_{in}} \tag{4.4}$$

$$L_{gmd} = \frac{\mu \cdot n^2 \cdot d_{avg} \cdot c_1}{2} \cdot \left(\ln\left(\frac{c_2}{\rho}\right) + c_3 \cdot \rho + c_4 \cdot \rho^2 \right) \tag{4.5}$$

avec L_{gmd} la valeur d'inductance (H), n le nombre de tours, μ la perméabilité, ρ le taux de remplissage et d_{avg} le diamètre moyen définis plus haut et les coefficients c_i dépendant de la forme de l'inductance (Tableau 4.1).

Forme	Coefficients c_i			
	c_1	c_2	c_3	c_4
Carré	1.27	2.07	0.18	0.13
Hexagonal	1.09	2.23	0	0.17
Octogonal	1.07	2.29	0	0.19
Circulaire	1	2.46	0	0.20

Tableau 4.1. Coefficients c_i en fonction de la forme d'inductance.

Les courbes 4.17 et 4.18 ont été réalisées avec la relation (4.5) et montrent que le changement de forme ne modifie pas le sens de variation de l'inductance en fonction du diamètre extérieur, ni même en fonction du nombre de tours. De plus, ces simulations montrent que la forme carrée donne la plus grande valeur d'inductance, quelle que soit la configuration.

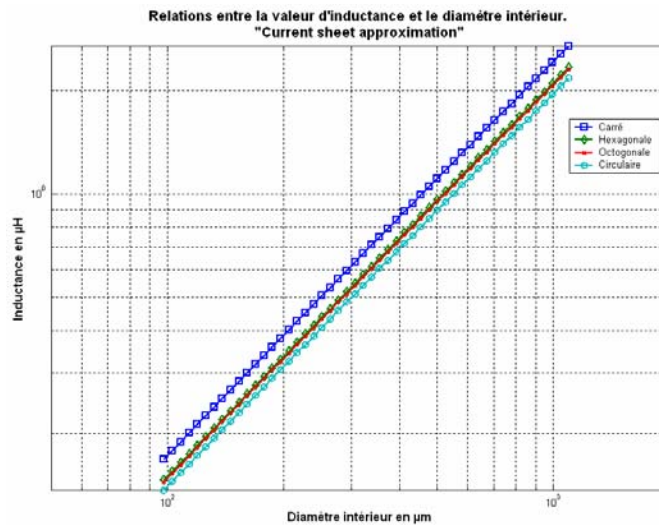


Figure 4.17. Influence du diamètre extérieur sur la valeur de l'inductance en fonction de sa forme.

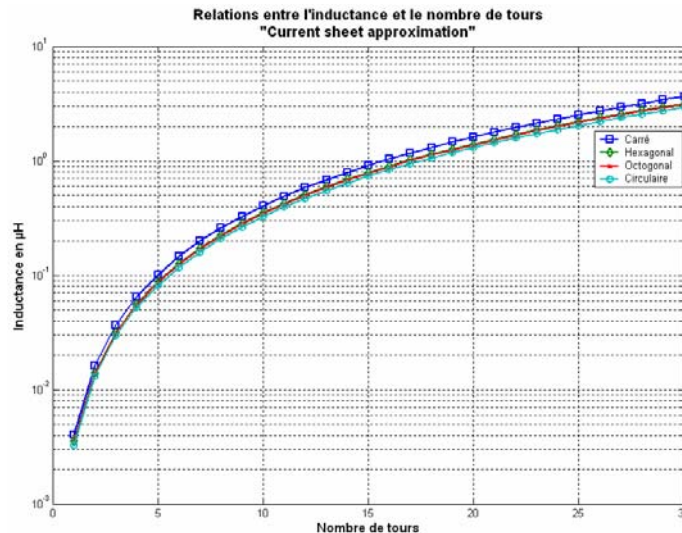


Figure 4.18. Influence du nombre de tours sur la valeur de l'inductance en fonction de sa forme.

IV.4.3 Répartition de la densité de courants dans le conducteur.

Nous venons d'étudier l'influence de la forme de l'inductance sur ses caractéristiques électriques. Le passage d'une bobine carrée à 4 faces, à une bobine circulaire, que les outils de CAO approximent à un polygone à n faces provoque, à paramètres géométriques constants, une légère baisse de l'inductance et de la résistance. Néanmoins il a été montré que le comportement fréquentiel d'une inductance circulaire était de loin le meilleur avec un facteur de qualité plus important et une fréquence de résonance repoussée vers les hautes fréquences. D'autre part, cette configuration semble être celle qui présente le moins de contraintes au passage du courant.

IV.4.4 Etude électrothermique.

Cette étude est centrée sur le comportement électrique de fils de connexion en or dont la largeur est comprise entre 20nm et 1000nm. La première raison de la cassure d'un fil métallique soumis à un stress électrique est l'élévation de la température engendrée par le mouvement des électrons dans le conducteur. Cet échauffement du métal provoque à son tour un stress mécanique qui affaiblit le conducteur jusqu'à sa cassure.

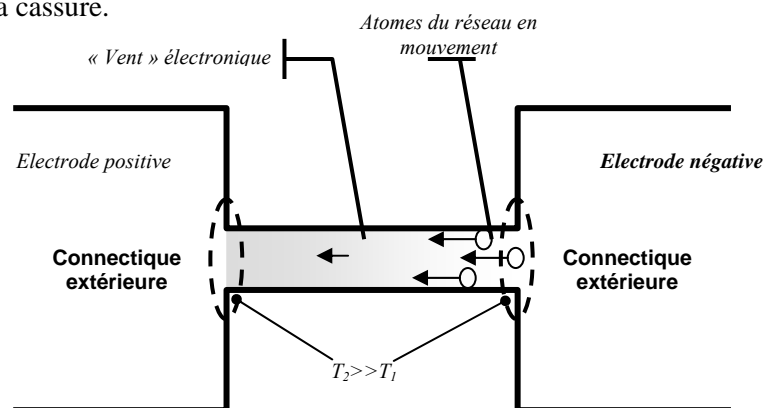


Figure 4.19. Représentation schématique d'un nanofil relié à deux éléments de connectique classique.

Une deuxième cause de rupture est l'électro-migration. Il se caractérise par le déplacement des atomes du réseau cristallin sous l'effet des chocs avec les électrons : nous parlerons alors de « vent »

électronique (Figure 4.19). Ce phénomène est d'autant plus important que la température de la structure augmente car les atomes deviennent de plus en plus mobiles et se déplacent plus facilement.

Le rapport de section de fil entre la connectique extérieure du circuit et les connexions nanométriques entraîne une brusque discontinuité de densité de courant (Figure 4.19). Il en découle un fort gradient de température au niveau de la jonction de ces deux conducteurs. La différence d'agitation du réseau atomique implique que la quantité de matière qui se déplace n'est pas remplacée au même rythme au niveau de la jonction. Les cassures se produisent essentiellement dans la partie du conducteur la plus proche de l'électrode négative.

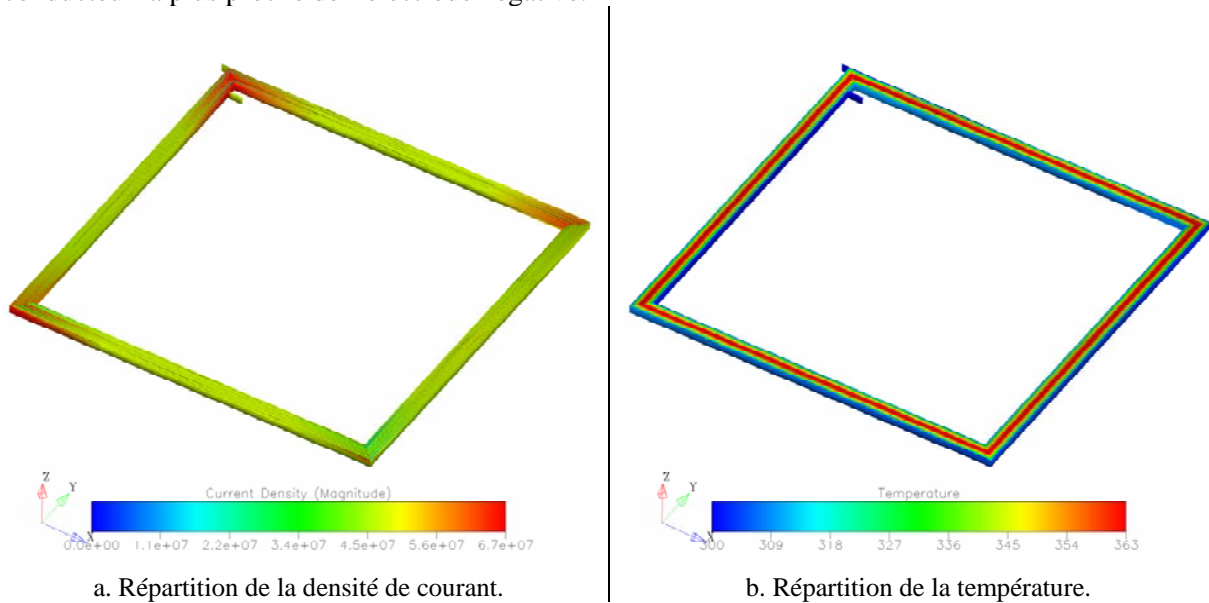


Figure 4.20. Comportement électrothermique d'une inductance carrée.

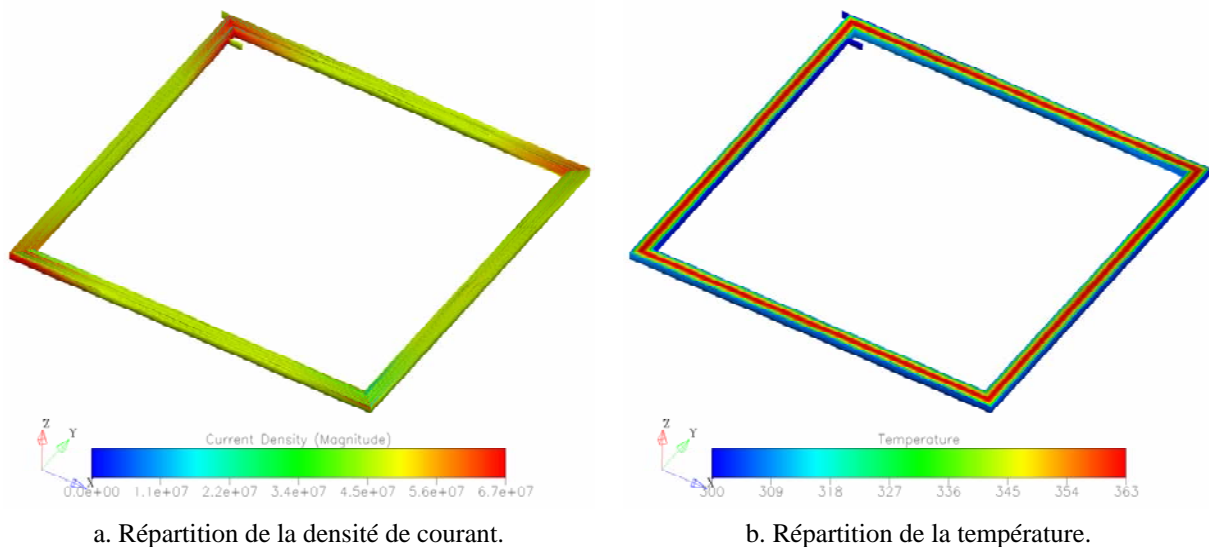


Figure 4.21. Comportement électrothermique d'une inductance carrée.

Pour l'inductance carrée, une rupture peut intervenir à deux endroits différents. Tout d'abord au milieu des conducteurs situés au cœur de l'enroulement, car étant longs et étroits, ils seront très sensibles au stress mécanique provoqué par l'échauffement. Ensuite, les conducteurs peuvent céder au niveau des angles car ils sont le lieu de discontinuités de densité de courant. Les phénomènes

d'électromigration sont alors les plus importants. Couplés avec l'échauffement, l'électromigration provoque des déplacements de matière au niveau des angles qui risquent de les fragiliser et donc de provoquer leur rupture.

Pour les inductances octogonales et circulaires, les phénomènes d'électromigration ont une influence moindre du fait de la meilleure uniformité de la densité de courant. Les ruptures interviennent certainement au milieu des conducteurs situés au cœur de l'enroulement. Le rapport entre la longueur des conducteurs et leur largeur les rend sensibles à l'élévation de la température. Par ailleurs, nous avons vu que le changement de forme a de multiples conséquences sur :

- L'encombrement à paramètres géométriques constants,
- Le comportement fréquentiel à paramètres géométriques constants,
- Les conditions de défaillance des conducteurs.

Ces études en simulation mènent à penser qu'une forme circulaire est la plus adaptée pour une inductance car ses performances sont grandement améliorées, notamment en terme de facteur de qualité. D'autre part, cette forme permet de réduire les risques de défaillance des conducteurs, en limitant les discontinuités de densité de courant. Cette orientation est en opposition avec les inductances carrées qui sont réellement utilisées. En effet, ces dernières sont plus faciles à traduire par les outils de CAO. Les approximations qu'ils réalisent dans le cas d'une bobine circulaire pourraient entraîner des défauts lors de la création des masques qui rendraient le processus défaillant. Le changement de forme ne modifie pas de manière radicale la résistance série de ces bobines.

IV.4.5. Le nano-imprint comme technique de réplique.

Le développement des nanotechnologies est un des enjeux majeurs des années à venir. Les applications les plus développées aujourd'hui se rencontrent bien évidemment dans le domaine de l'électronique. La diminution des dimensions des composants va rendre, à terme, obsolète les procédés actuels de photo réplique, dont la résolution atteint les limites physiques dans le domaine UV (320nm à 480nm pour l'UV proche et 200nm à 300nm dans l'UV lointain). La nécessité d'augmenter la résolution implique donc une diminution progressive de la longueur d'onde.

L'utilisation d'un microscope électronique modifié, émettant des électrons dont la longueur d'onde est inférieure à celle des photons émis dans l'UV, constitue une solution pour réaliser des structures sub-microniques. C'est cette solution qui a été adoptée par le LAAS-CNRS il y a trois ans. Son emploi présente néanmoins deux inconvénients majeurs :

- La vitesse de gravure : environ 30h pour couvrir 1cm²,
- Le coût d'achat et de mise en œuvre.

La réplique de nano-structures passe obligatoirement par le développement de la lithographie électronique. Toutefois, la faible vitesse de gravure rend impossible une production de nano-composants à l'échelle industrielle. La solution vient par l'utilisation de techniques de moulage, le principe étant adapté à une production de masse. Nous parlons alors de « lithographie électronique assistée par moulage pour la conception de nanostructures » ou MAL (*Mold Assisted Lithography*) (figures 4.22 et 4.23).

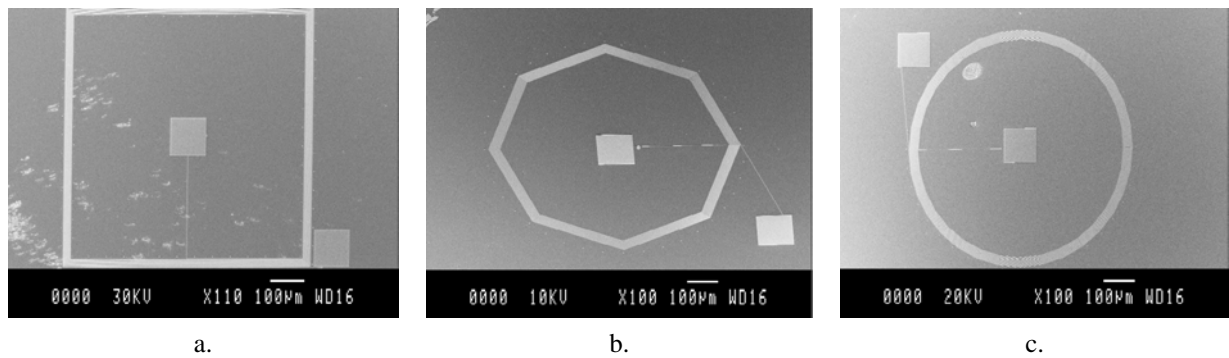


Figure 4.22. Différents types de moule.

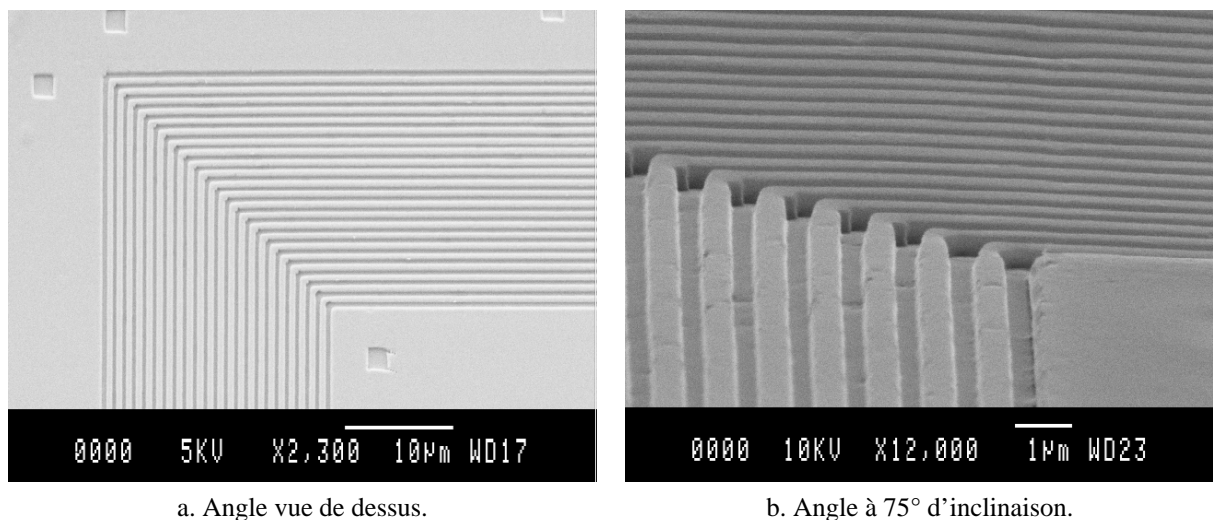


Figure 4.23. Résultat du moulage d'une bobine carrée.

IV.4.6. La croissance d'or 3D.

Le principe de la croissance 3D (*Figure 4.24*) est lui basé sur l'absence de couche métallique sous la résine et sur le dépôt ionique d'une couche d'or sur tous les flancs et surfaces de l'échantillon. L'intérêt de cette technique réside principalement dans le fait qu'il n'est plus nécessaire de supprimer l'ensemble de la résine épaisse. Il suffit de graver l'épaisseur voulue de résine épaisse puis venir déposer une couche de métal par pulvérisation ionique, de manière à ce qu'elle vienne recouvrir toutes les surfaces de l'échantillon.

Pour cela, un mouvement planétaire (*rotation selon un plan horizontal associée à une variation de l'inclinaison*) sera appliqué à l'échantillon de manière à ce que l'ensemble des flancs des motifs soit recouvert d'or. Par la suite, une croissance électrolytique classique va remplir le volume en utilisant la couche pulvérisée comme contact électrique.

Le surplus de croissance en surface (*le dépôt ionique se faisant sur toute la surface, l'or électrolytique croira partout*) peut être supprimé par polissage mécano-chimique. Cette technique laissant la résine en place, nous pouvons penser développer un tel procédé pour construire la bobine dans un caisson de résine aux propriétés électriques (*permittivité, coefficient de perte...*) assurant de faibles pertes d'énergie en fonctionnement.

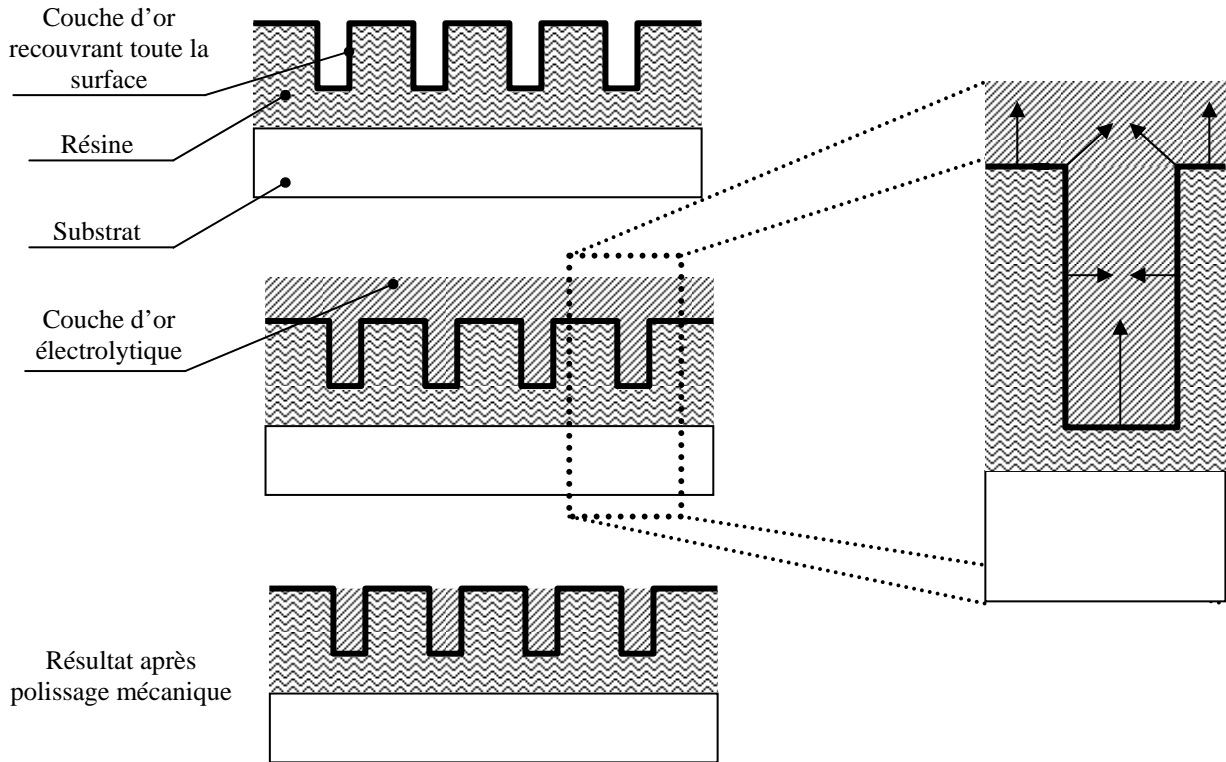


Figure 4.24. Processus technologique de croissance 3D

Néanmoins il existe un inconvénient à cette technique. En nous basant sur les résultats présentés dans la littérature, nous pouvons nous attendre à ce que, dans le bain électrolytique, les lignes de courant viennent se concentrer sur les arêtes du motif. Ainsi, nous risquons de voir une croissance plus importante à cet endroit qu'au fond du motif. De plus, des inclusions d'air pourraient se produire lors de la croissance du conducteur.

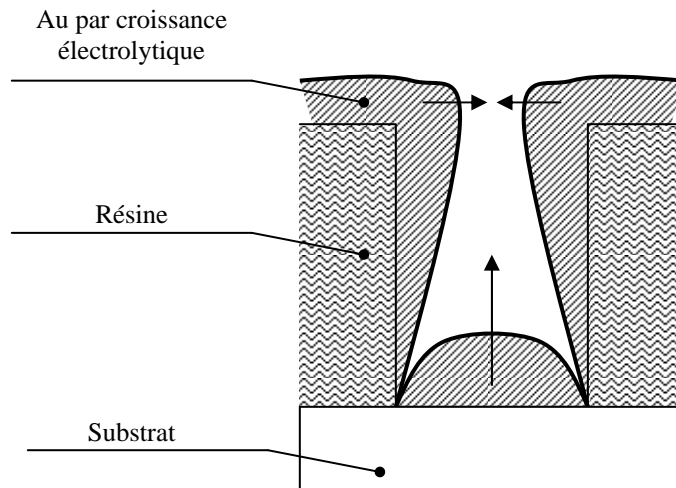


Figure 4.25. Représentation d'une possible croissance parasite.

Le problème pourrait être évité en appliquant la densité de courant la plus faible possible afin d'obtenir une croissance suffisamment lente. D'autre part, l'utilisation d'un bain très concentré en espèces chimiques est recommandée par la littérature.

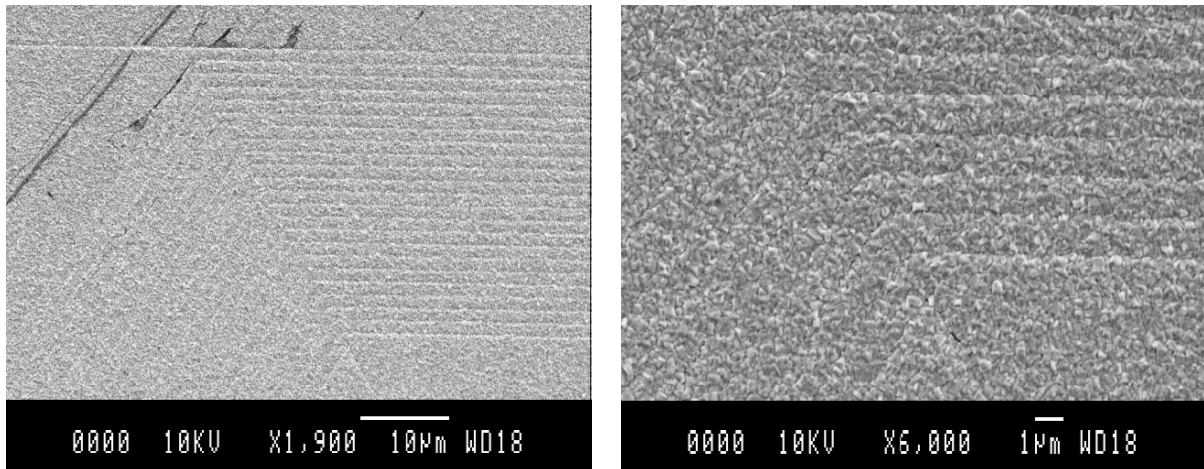


Figure 4.26. Résultat après croissance électrolytique sur un motif octogonal.

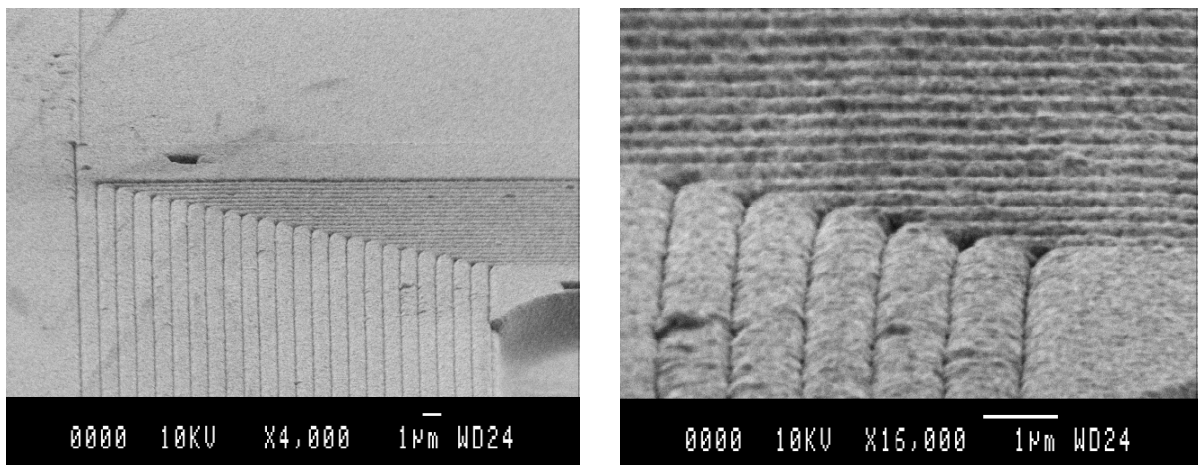


Figure 4.27. Résultat après croissance électrolytique sur un motif carré.

Les images ci-dessus (*figures 4.26 à 4.27*) montrent un premier essai de dépôt suivant le protocole décrit précédemment. Nous avons déposé une couche de 7800 Å d'or, avec une couche d'accroche de 200 Å. Nous voyons que l'or s'est déposé uniformément sur toutes les surfaces en épousant les détails du motif.

Ainsi, nous pouvons conclure que la couche d'accroche a été correctement déposée et que le procédé est valable. Ces étapes de croissance de métal ont été menées sur des moulages de motifs micrométriques. La deuxième étape consiste maintenant à passer à des motifs submicroniques, comme présenté en figures 4.27 et 4.28.

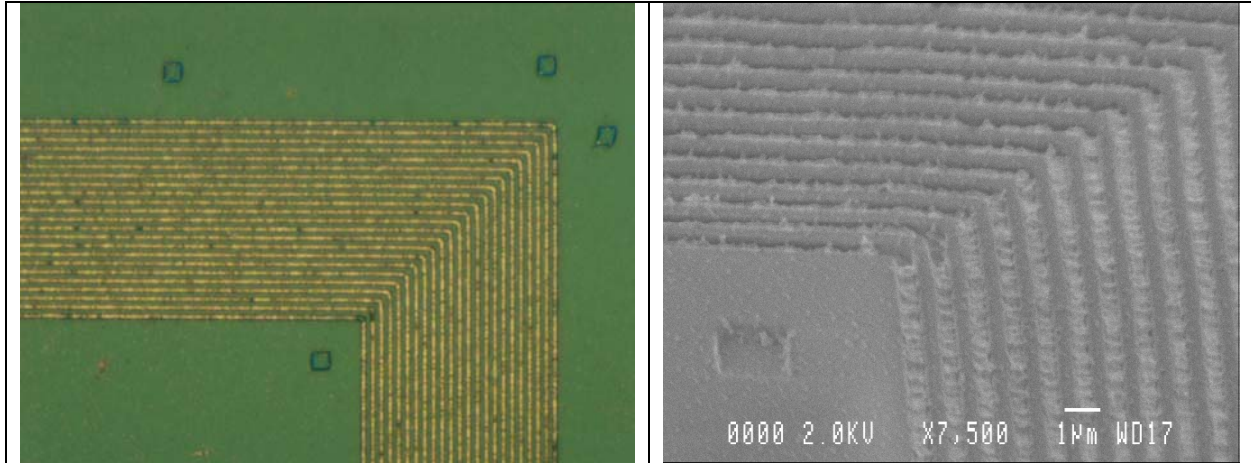


Figure 4.28. Angle d'une bobine carrée.

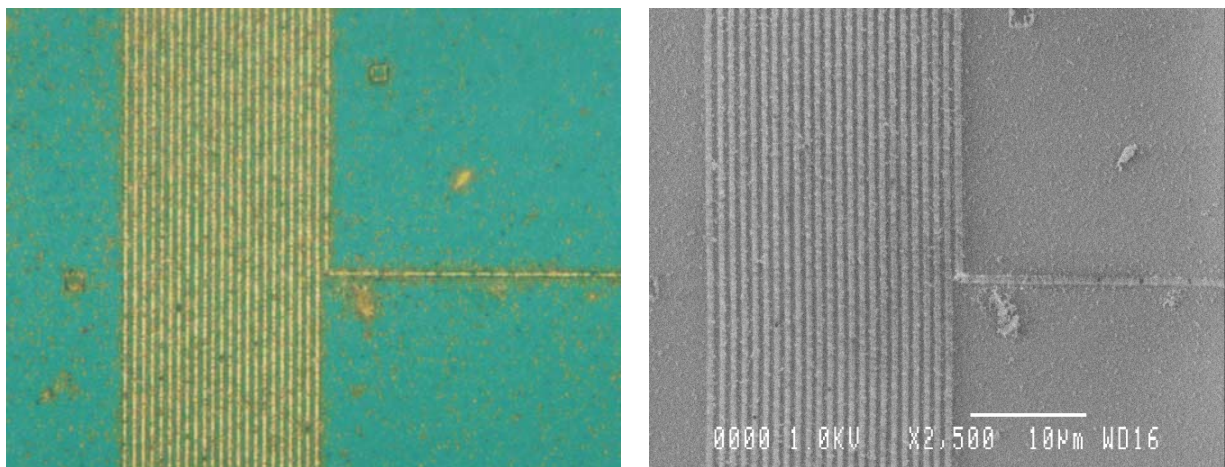


Figure 4.29. Conducteurs et départ vers le plot de contact d'une bobine carrée.

IV.4.7. Synthèse.

Nous avons présenté l'essentiel des résultats obtenus et réalisés à ce jour, permettant l'obtention d'une grande valeur d'inductance en réduisant au maximum la largeur des conducteurs ($< 1\mu\text{m}$). Le procédé de nano-imprint relatif à cette application a été présenté. Nous avons opté pour la méthode de croissance électrolytique 3D que nous essayons de développer vis-à-vis d'une croissance classique.

De manière générale, le résultat est très positif car, avec une série d'étapes technologiques simples et relativement innovantes (*Nanoimprint assisté par croissance 3D*), nous avons réussi à réaliser des lignes d'or de $0,3\mu\text{m}$ de large et de $0,480\mu\text{m}$ d'épaisseur, sur des longueurs pouvant atteindre $700\mu\text{m}$ et continues sur la presque totalité du bobinage.

IV.5 Perspectives.

IV.5.1 Généralités.

A coté du développement de composants, les travaux de recherche doivent s'accompagner d'une réflexion globale sur les architectures de conversion, leurs capacités à être intégrées et pilotées, afin

d'utiliser au mieux ces nouveaux composants d'évaluer leurs performances, valeurs, encombrements et fiabilités. Ceci implique d'adopter une démarche de conception complémentaire et commune entre technologues, électroniciens de puissance, automaticiens et concepteurs de MEMS, en considérant dès le début des études le système à alimenter dans sa globalité (*de sa conception à sa réalisation*).

Cette partie repose sur des collaborations déjà existantes depuis de nombreuses années avec des laboratoires nationaux, comme le LEEI et le LEG, et internationaux comme l'UPC et l'URV. Nous comptons poursuivre nos collaborations à travers la mise au point de nouvelles architectures de conversion répondant au mieux au cahier des charges et l'étude de nouvelles lois de commande spécifiques aux micro-systèmes.

L'obtention de nouveaux composants passifs ainsi que l'étude de nouveaux matériaux de stockage magnétique, effectuée en collaboration avec le CIRIMAT, feront l'objet de gros efforts de recherche. Ainsi, en se basant là aussi sur l'expérience acquise dans ce domaine par le laboratoire, nous comptons développer des techniques d'assemblage appropriées aux applications micro-systèmes.

Aujourd'hui, une partie de nos travaux se concentrent sur le développement de nano-inductances, de micro-sources et micro-alimentations intégrées dont les principaux résultats ont été développés dans ce chapitre. Les retombées attendues sur cette partie concernent le domaine de la conversion d'énergie au sens large.

En résumé, les compétences requises pour mener à bien ces recherches sont par essence pluridisciplinaires. Ainsi, nous nous basons sur le savoir faire acquis par le laboratoire sur :

- **Les nano et micro-technologies** (*gravure, dépôt, croissance*), dédiées à la puissance, permettant de réaliser des interrupteurs actifs et des composants passifs de stockage,
- **l'intégration de fonctions**, pour la sécurisation des interrupteurs et la réduction de leur consommation,
- **les techniques d'optimisation de performances**, pour créer de nouveaux composants parfaitement adaptés à l'application,
- **la réalisation de nouvelles structures de conversion** adaptées à l'intégration,
- **l'étude de nouvelles micro-sources électriques de très faible puissance** ainsi que de batteries de stockage pour augmenter l'autonomie de l'application,
- **l'optimisation de lois de commandes**, pour assurer une production maximale de puissance électrique, une robustesse de l'ensemble et une parfaite adaptation entre une source et une charge,
- **les techniques d'assemblage et d'amincissement** des divers composants pour aller vers le convertisseur statique tout intégré,
- **l'étude des propriétés de nouveaux matériaux magnétiques de stockage**, couvrant une plage de fréquence allant jusqu'aux hyper-fréquences, afin d'améliorer les performances des éléments inductifs et diminuer le taux de CEM,
- **l'étude de nouveaux matériaux isolants**, présentant une meilleure perméabilité, afin d'améliorer les performances des condensateurs intégrés,
- **divers moyens de caractérisation** pour tester les performances des composants en cours de conception,
- **divers outils de simulation et de modélisation** de micro-sources, MEMS et MOEMS, micro-alimentations.

IV.5.2 Approche envisagée pour réaliser une alimentation intégrée.

Les problèmes à résoudre pour créer des alimentations intégrées butent encore sur l'existence même de composants spécifiques à haut rendement, autant en éléments de commutation qu'en éléments de stockage temporaire de l'énergie électrique. En effet, l'obtention de nouveaux composants et de nouvelles fonctions fait éventuellement appel à de nouveaux matériaux. Ces travaux d'envergure font d'ailleurs l'objet de collaborations internes, nationales et internationales.

L'optimisation et la réalisation de condensateurs et d'inductances sur silicium nécessitent un important effort de recherche. Le choix d'effectuer des travaux sur le développement de composants passifs utilisés pour stocker de l'énergie à l'échelle de la commutation, à travers des capacités et des inductances, a été fait au LAAS-CNRS il y a maintenant plusieurs années. En se focalisant tout d'abord sur l'étude et l'obtention d'éléments passifs de faibles valeurs (*d'un micro Henry pour les inductances et d'un micro Farad pour les capacités*), diverses techniques de dépôts et de croissance pourront être mises au point et ensuite extrapolés si nécessaire.

Ces études peuvent être divisées en trois parties distinctes : une sur les matériaux, une deuxième sur les éléments capacitifs et une dernière sur les éléments inductifs :

- Nouveaux matériaux pour le stockage.

Nous comptons poursuivre les études et le développement de nouveaux matériaux permettant un meilleur stockage énergétique à l'échelle de la commutation, sur les deux points suivants :

- Les matériaux présentant des propriétés magnétiques appropriées à la conversion d'énergie, à travers des collaborations établies avec le CIRIMAT par exemple, ou le contrat Région « Elaboration et évaluation des potentialités de couches ferromagnétiques pour applications RF et micro-ondes ».
- Les matériaux à forte constante diélectrique, tels que des oxydes thermiques, qui à terme pourront remplacer les diélectriques usuels destinés à la réalisation d'éléments capacitifs.

Cette évolution passe par la synthèse de nouveaux matériaux, la mise au point de leurs techniques de dépôt, l'étude des contraintes qu'ils subissent en conditions réelles de fonctionnement. Nous pensons nous focaliser notamment sur l'étude du comportement de ces éléments en fréquence et en tension pour, d'une part, augmenter la fréquence de travail et, d'autre part, améliorer leur tenue en tension. Une attention particulière sera portée sur l'évolution du rendement électrique de ces objets et sur les origines des pertes ainsi que de leur localisation.

- Réalisation de condensateurs à silicium.

Traditionnellement, les condensateurs sur silicium ont été mis au point en utilisant des diélectriques classiques de la microélectronique comme l'oxyde de silicium. Deux solutions sont aujourd'hui envisagées pour continuer à augmenter les valeurs des capacités de stockage jusqu'à une dizaine de microfarads par mm^2 :

- réaliser des structures en tranchées, permettant d'augmenter la surface effective de l'armature par unité de surface de la puce,
- remplacer les diélectriques usuels par des matériaux à forte constante diélectrique (*dépôts de nitrures*), rejoignant ainsi les préoccupations développées au paragraphe précédent.

Nous proposons ainsi de nous orienter vers des structures en tranchées optimisées pour des tensions inférieures à 5V et des forts courants, en étudiant le dépôt de diélectriques présentant des

permittivités supérieures à celle de l'oxyde de silicium. Ces travaux s'inscrivent dans une collaboration entre l'équipe CIP et TMN, menée depuis quelques années à travers le laboratoire commun LCIP. Aujourd'hui, l'expérience acquise dans ce domaine devrait rapidement permettre d'obtenir des prototypes de démonstration répondant parfaitement aux contraintes spécifiques des MEMS.

Une étude de fiabilité des composants sera réalisée au fur et à mesure de l'avancée des différents prototypes. A l'issue de la première année, les spécifications géométriques ainsi que les connexions de ce composant devront être définies et discutées en vue d'effectuer l'assemblage dans le prototype final du convertisseur statique.

- Réalisation d'éléments inductifs.

Concernant les inductances, composants complémentaires aux capacités dans diverses topologies de convertisseurs statiques, nous comptons poursuivre l'étude et l'élaboration des deux filières technologiques qui doivent aboutir à terme à la réalisation de nano inductances et de micro bobines. La première voie repose sur la poursuite de la réalisation d'éléments inductifs nommés nano-inductances à partir de techniques de nano-imprint. La deuxième voie consiste à réaliser des micro-bobines sur silicium basées sur des techniques classiques de photolithographie et permettant d'obtenir des moules de résines épaisses en vue d'avoir des densités de courant plus importantes. Les technologies d'électrodéposition de matériaux conducteurs et de matériaux magnétiques seront optimisées selon la taille des objets obtenus et font actuellement l'objet d'attentions particulières communes aux deux voies. Pour adapter les éléments inductifs aux MEMS et aux MOEMS, nous comptons donc renforcer :

- La modélisation fine du comportement de l'élément inductif : Cette étude se base sur l'utilisation d'outils de CAO dédiés Microsystèmes tels que ceux contenus dans les solutions Coventorware de Coventor ou SABER. Nous nous proposons de poursuivre les différents travaux de modélisations aux éléments finis de la structure inductive, amorcés il y a deux ans, afin de mieux appréhender le comportement fréquentiel de l'objet, d'étudier la variation de la densité de courant dans les conducteurs ou encore l'échauffement de la structure. Cependant, nous devons modéliser également l'enveloppe magnétique nécessaire à la canalisation du flux magnétique et ainsi respecter les normes d'émission de CEM et réduire les pertes. Un travail constant et important commun devra être effectué avant d'obtenir des résultats scientifiques intéressants. D'autres outils seront utilisés, en particulier par CISHT, dans le cadre d'une modélisation électromagnétique précise devant reproduire de la façon la plus exacte possible le comportement fréquentiel de l'élément inductif.
- La mise au point de modèles électriques de type Spice ou Saber de l'objet inductif : afin de poursuivre les études précédentes par des simulations globales, comprenant le convertisseur statique intégré dans son intégralité, la micro-source mais aussi le ou les microsystèmes à alimenter, il est indispensable d'extraire des modèles comportementaux simplifiés des modèles à éléments finis. Ces travaux vont se poursuivre sur la base de l'étude de l'exemple des micro-miroirs qui a permis de développer une méthode de modélisation appropriée et valider divers outils de simulation. D'autres applications pourront être envisagées au fur et à mesure des avancées des travaux sur la synthèse et la classification des besoins énergétiques des microsystèmes.
- La réalisation de nano inductances : Cette phase du projet se base sur une expérience de deux ans qui doit être poursuivie et renforcée par de nouvelles études, en particulier sur de nouvelles résines permettant un bon moulage de l'inductance. Etant donnée la taille de la section des conducteurs (*inférieure au micromètre carré*) vis à vis de leur longueur totale (*1mm maximum*), l'enjeu est de

taille. Aujourd'hui, des résultats technologiques partiels sont prometteurs et sont en cours de caractérisation. Cette phase du projet à l'origine développée au sein de TMN, se poursuit aujourd'hui à travers une collaboration entre TMN, le nouveau groupe NANO et le service TEAM. L'effort entrepris devra porter sur le développement de nouvelles résines compatibles avec toutes les étapes technologiques, notamment celles de dépôt de métal et de matériau magnétique.

- La caractérisation et fiabilisation des inductances obtenues : ces mesures devant être systématiques, la création d'un banc de test spécifique est nécessaire. Nous souhaitons dans un premier temps faire appel à l'aide du service 2I sur l'établissement d'un cahier des charges très précis et sur les études qui pourront être faites sur ce banc. Il faudra notamment pour ne pas disperser les moyens, réaliser un banc de test unique à tous les prototypes réalisés au LAAS-CNRS, pouvant ainsi accueillir et tester plusieurs formes d'éléments inductifs ainsi que plusieurs tailles, sous diverses puissances (*du micro-watt au watt*) et couvrant une large gamme de fréquences de fonctionnement. Concernant la caractérisation du comportement fréquentiel, une partie des installations déjà développées par le groupe CISHT pour des applications RF pourra être utilisée moyennant quelques adaptations. Ces moyens déjà disponibles pour la gamme de fréquences 9kHz-67 GHz permettront une extraction précise de certains éléments du modèle.

IV.5.3 Structures nouvelles de conversion pour l'intégration.

Du fait que les sources d'énergie sont rarement compatibles en tension, en courant, voire en fréquence avec l'application qu'elles alimentent, des structures de conversion sont nécessaires, traditionnellement basées sur des composants de puissance en commutation. Ainsi, une électronique de puissance d'interface basée sur des composants actifs et passifs, pour le transfert d'énergie, mais aussi sur des lois de commande et des organes de sécurité, est indispensable. La structure et les composants doivent être choisis en adéquation avec les particularités du contexte. Nous nous proposons donc d'étudier dans cette partie l'intégrabilité des différents organes « capacité et inductance ».

Nous considérerons ici de nouvelles structures de convertisseurs, utilisant les propriétés réelles des nouvelles structures capacitatives et inductives intégrées développées au point 2.1. A ce stade, les deux options « System On Chip » ou « System On Package », faisant intervenir des notions de micro-assemblage et présentant des potentiels seront évaluées, en se basant notamment sur les compétences acquises par le groupe MIS sur les techniques d'assemblage, d'amincissement et report de structures microélectroniques, mais aussi sur les études de fiabilité de structures reportées par l'analyse du comportement électrique. Tous ces travaux devront aboutir à la définition des dimensions du prototype.

Nous comptons pour mener à bien ces travaux minutieux continuer les travaux actuels menés en collaboration avec l'Université Rovira y Virgili de Tarragone (*URV*) et l'Université Polytechnique de Catalogne (*UPC*) sur l'étude et la mise au point de nouvelles structures de conversion modulaires en vue de les rendre intégrables. Cette étude fait d'ailleurs l'objet d'un poste rouge CNRS affecté à l'équipe TMN et démarré en 2003. Nous comptons également poursuivre les travaux effectués avec le LEEI et le LEG, laboratoires français de recherche avec qui nous travaillons également sur des architectures modulaires partiellement intégrées et des couplages et stockages énergétiques. Ces études sont notamment labellisées par divers programmes CNRS, comme le programme ENERGIE et le RTP

Génie Electrique, et peuvent devenir une force importante dans les différents réseaux d'excellence et projets intégrés européens auxquels le LAAS-CNRS participe, comme le projet TARGET.

La réalisation de convertisseurs statiques entièrement intégrés, permettant une entière compatibilité en taille avec des objets micro-usinés, passe par plusieurs étapes. D'une part, le choix de structures adéquates de conversion permettra à terme de réaliser des alimentations entièrement compatibles en taille et en consommation avec les applications. Pour cela, des travaux sur l'amélioration des matériaux et des filières technologiques de conversion de puissance doivent être renforcés pour s'adapter aux critères fort courant, très faible tension ou bien dans un autre domaine, forte tension, courant faible.

Il est probable qu'arriver à une alimentation complètement intégrée, les structures actuelles adaptées à des composants discrets ne puissent pas être directement miniaturisées. Il faudra ainsi faire preuve d'innovation dans des structures spécifiques réalisant la même fonction qu'en discret.

Le projet de recherche porte sur l'étude et, éventuellement, la réalisation de micro-sources d'énergie et de micro-convertisseurs statiques entièrement intégrés compatibles en taille et en consommation avec des applications de type MEMS et MOEMS. Les recherches d'envergure que nous devons mener dans ce projet pour réaliser une alimentation intégrée, jouant le rôle d'étage d'adaptation et comprenant sa propre loi de commande, sont par essence pluridisciplinaires, faisant appel à des notions poussées de microélectronique, micro et nano technologie, d'électronique de puissance mais aussi d'automatique, de technologie des processus, de matériaux de stockage, de thermique, de caractérisation allant jusqu'aux hyper-fréquences, etc... Ces préoccupations entrent entièrement dans les orientations actuelles du LAAS-CNRS en matière de conversion d'énergie mais il reste cependant à les fédérer autour d'une ou plusieurs applications.

Les compétences requises pour mener à bien ce projet sont en grande partie amorcées et développées au sein même de notre laboratoire, mais elles sont actuellement dispersées dans plusieurs groupes de recherche du LAAS-CNRS et deux pôles thématiques qui sont MINAS et MOCOSY. Au cours de diverses discussions menées sur ces derniers mois, il s'est dégagé une volonté de fédérer les diverses contributions scientifiques autour de cette thématique actuellement en émergence à travers la mise en commun de moyens technologiques et modélisations pour d'une part, bénéficier des efforts déjà réalisés depuis de nombreuses années dans cette voie et, d'autre part, conforter l'avance acquise par notre laboratoire sur le plan national et international dans ce domaine.

A l'image du programme Energie du CNRS, qui fait appel aux compétences de différents départements du CNRS, ce programme pluridisciplinaire en matériaux, développement technologique, conception de structures de puissance, de commande et de microsystèmes est fédérateur, notamment entre les groupes de recherche s'intéressant à l'intégration de puissance, aux micro-technologies et aux microsystèmes.

Conclusion générale.

Les travaux accomplis au cours de ces huit années de recherches ont abouti au développement de nouvelles architectures de conversion de puissance dédiées à des sources d'énergie électriques renouvelables. La systématique de la démarche employée a d'ores et déjà permis d'obtenir quelques avancées dans le domaine de la conversion d'énergie électrique, en particulier sur la fiabilité des systèmes électriques et l'augmentation du rendement de conversion.

Concernant les travaux sur la conversion d'énergie PV, notre premier but, consistant à développer le concept de modularité de la chaîne de conversion, a donné lieu au développement de nouvelles architectures à très haut rendement de conversion. Les points forts de ces dernières consistent en une indépendance de chaque source élémentaire, permettant une production maximale, indépendamment du reste du système.

Cette maximisation de la production, compte tenu du caractère fluctuant de la source PV considérée, passait par le développement de commandes de types MPPT performantes, à hauts rendements, en particulier lors des divers transitoires (*changements brusques d'ensoleillement*). Pour notre part, nous avons opté pour des commandes de type analogiques, à dynamique rapide. Deux commandes MPPT ont alors été développées dans ce cadre. La première a fait l'objet d'un dépôt de brevet en 2001, portant sur une détection instantanée d'une perte de PPM sans capteur et un recouvrement très rapide du nouveau PPM ($< 1ms$). La deuxième, en cours de publication, permet d'assurer que le système ne perd plus le PPM. Les rendements obtenus pour ces commandes en cours d'évaluation sur notre site expérimental sont très élevés ($> 97\%$ en transitoire). La rapidité de réponse de ces commandes vis-à-vis d'un changement avoisine le temps d'une période de hachage du convertisseur sur lequel elle est implantée. Des collaborations actuelles avec EDF visent à valoriser ces travaux notamment en intégrant la loi de commande.

La validation de ces travaux, autant sur les architectures que sur les lois de commande, a permis de prouver la pertinence d'une commande MPPT au plus proche du générateur photovoltaïque. Le concept de modularité discrétisé à quelques cellules est en cours de validation sur divers convertisseurs DC-DC élémentaires qui, eux-mêmes connectés entre eux, forment une chaîne pouvant soit se raccorder à un réseau électrique de type alternatif moyennant un nouvel étage d'adaptation, soit alimenter un organe de stockage de type batterie. Ces travaux d'envergure sont en cours de développement sur plusieurs architectures pour généraliser divers concepts d'associations. Ces travaux sont réalisés en collaboration avec l'URV de Tarragone.

Le banc de mesure présenté a permis quant à lui de déduire les divers rendements électriques et énergétiques d'une ou plusieurs chaînes de conversion, réalisées à partir de convertisseurs élémentaires. De plus, il a permis d'effectuer des mesures en simultané sur différents chargeurs ou convertisseurs et d'analyser le comportement de ces derniers en pouvant effectuer des comparaisons directes. Il constitue donc aujourd'hui un outil original d'évaluation des convertisseurs présentant des potentialités très intéressantes que nous pouvons mettre à la disposition de la communauté scientifique. Ce banc de mesures continue à évoluer et nous sert régulièrement à tester de nouvelles commandes MPPT, de nouveaux convertisseurs élémentaires DC/DC, ainsi que de nouvelles associations de convertisseurs. Il est actuellement la base de validation des travaux accomplis sur le couplage du PV avec d'autres sources d'énergies et sur le stockage.

Les études sur le couplage entre le photovoltaïque et d'autres sources d'énergies ont débuté en 2000 et ont porté sur la conception et la réalisation de générateurs d'énergie en réseaux. L'accent a été mis sur le caractère modulaire des diverses architectures de conversion proposées. Même si la cible visée en premier lieu concernait les réseaux électriques autonomes, le caractère générique de notre approche permet aujourd'hui de projeter les résultats obtenus vers des systèmes connectés à des réseaux centralisés. Notre objectif était d'assurer une augmentation de la production d'énergie d'une chaîne de conversion donnée, tout en la rendant plus robuste et plus fiable dans la continuité des travaux développés jusqu'à présent. Ces études ont permis de généraliser les concepts de chaînes modulables développées spécifiquement pour le PV. Les résultats obtenus à ce jour permettent d'ores et déjà d'envisager des réductions de coût par la création de chaînes optimales présentant des durées de vie plus importantes.

Des travaux sur la modélisation des éléments de stockage utilisés dans des conditions extrêmes se sont rapidement avérés nécessaires lors des différentes études menées autant sur l'énergie PV proprement dite que sur le couplage. En effet, l'élément de stockage est de plus en plus au cœur de la production de sources d'énergie ayant des caractéristiques fluctuantes. Cet élément permet en effet de réguler la production et de jouer le rôle d'étage tampon entre la production d'énergie et son utilisation. Cependant, les cycles de charge et de décharge sont tels que le vieillissement des éléments de stockage est très rapide (souvent moins de trois mois dans le cas de sources PV).

Le chapitre 4, qui se veut ouvrir de nouvelles perspectives, en étudiant de plus près les convertisseurs, ne font pas fait l'objet d'études spécifiques jusque ici. Dans la continuité du concept de modularité et de discrétisation de la chaîne de conversion, il est aujourd'hui essentiel d'aborder les problèmes de miniaturisation des convertisseurs, ainsi que leur conception spécifique pour qu'elles présentent de faibles consommations. Pour cela, il faut élaborer des étages d'adaptation spécifiques à la conversion de puissance et aux diverses micro-sources d'énergie. En effet, assurer l'adaptation de telles sources d'énergies aux diverses applications visées., autant par la structure que par la commande, est un problème de recherche à part entière faisant appel à plusieurs disciplines de la physique.

L'illustration faite dans ce chapitre ne concerne que le développement d'une méthodologie pour élément de stockage passif. La technologie associée à ces objets, en cours de développement, fait

appel à diverses compétences développées par le LAAS-CNRS. Un exemple d'application de ces objets inductifs à un convertisseur statique montre bien que par des structures adéquates de conversion, on pourra à terme réaliser des convertisseurs entièrement compatibles en taille et en consommation avec les applications. Pour cela, des travaux sur l'amélioration des matériaux et des filières technologiques de conversion de puissance doivent être renforcés pour s'adapter aux critères fort courant, très faible tension ou bien dans un autre domaine, forte tension, courant faible.

Références bibliographiques.

- [I-1] Site Internet : <http://www.edf.fr>
- [I-2] B. Multon, O. Gergaud, H. Ben Ahmed, X. Roboam, S. Astier, B. Dakyo, C. Nikita, "Etat de l'art des aérogénérateurs », *L'électronique de puissance, vecteur d'optimisation pour les énergies renouvelables*, Ed. Novelect-ecrin, pp. 97-154, 2002.
- [I-3] P. Claux, "Atlas solaire français », PYC éditions, 1982.
- [I-4] T. Fromherz, F. Padinger, D. Gebeyehu, C. Brabec, J. C. Hummelen, Sariciftci, "Comparison of photovoltaic devices containing various blends of polymer and fullerene derivatives", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 63, Iss. 1, pp. 61-68, 2000.
- [I-5] F. T. Reis, D. Mencaraglia, S. Oould Saad, I. Séguy, M. Oukachmih, P. Jolinat, P. Destruel "Characterization of ITO/CuPc/Al and ITO/ZnPc/Al structures using optical and capacitance spectroscopy", *Synthetic Metals*, Vol. 138, Iss. 1-2, pp. 33-37, 2003.
- [I-6] I. Séguy, R. Mamy, P. Destruel, P. Jolinat, H. Bock, "Photoemission study of the ITO/triphenylene/perylene/Al interfaces", *Applied Surface Science*, Vol. 174, Iss. 3-4, pp. 310-315, 2001.
- [I-7] R. Meseenger, J. Ventre, "Photovoltaic systems Engineering", *CRC Press*, 1999.
- [I-8] P. Rueda, E. Fernandez, "Multijonction Ga/As Solar Cell Capacitance and its impact upon Solar Array Regulators", *6th European Space Power Conference*, Porto, Portugal, 6-10 May 2002, pp. 29-34, 2002.
- [I-9] E. Van den Berg, M. Kroom, "Algorithms and performances of a space dedicated solar array modelling tool", *6th European Space Power Conference*, Porto, Portugal, 6-10 May 2002, pp. 527-532, 2002.
- [I-10] D-L. King, S. Igari, W. Wattra, "Solar efficiency Tables, version 19", *Progress in photovoltaics : Research and applications*, Vol. 10, pp. 55-61, 2002.
- [I-11] L. Protin, S. Astier, « Convertisseurs photovoltaïques », *Techniques de l'Ingénieur*, Réf. D3360, vol. DAB.
- [I-12] H. Valderrama-Blavi, C. Alonso, J. Maixé-Altés, "Parametric Influence for Behavior Optimization in a single-Phase Five-level Inverter", *Automatika Journal for Control, Measurement, Electronics, Computing and Communications*, vol 3-4, n^o 40, pp 117-127, 1999.
- [I-13] C. Alonso, A. Martinez, "Optimisation d'une chaîne de production d'électricité photovoltaïque", *Colloque national sur la recherche en photovoltaïque*, CNRS-ECODEV/ADEME, Sophia Antipolis, 22-23 sept. 97.

- [II-1] J. Schmid, W. Kleinkauf, "New trends in Photovoltaic Systems Technology", *14th EPVSEC*, pp. 1337-1339, 1997.
- [II.2] C. Alonso, A. Martinez, "Optimisation d'une chaîne de production d'électricité photovoltaïque", *Rapports d'activité sept 1997, oct. 1998, février 99 du programme CNRS/ECODEV-ADEME*.
- [II-3] C. Alonso, M.F. Shraif, A. Martinez, « Conception et réalisation d'une chaîne de production d'électricité photovoltaïque modulable », *Rapports de contrat région Midi-Pyrénées RECH 97001945*, oct. 99 (8 pages) et juin 2001 (34 pages).
- [II-4] M-F. Shraif, "Optimisation et mesure de chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque en énergie électrique », thèse soutenue le 23 Décembre 2002 à Toulouse.
- [II-5] H. Valderrama-Blavi, « Gestion Intelligente de un Ondulador Modular para Aplicaciones Fotovoltaicas », thèse soutenue en Février 2001 à Barcelone
- [II-6] J.P. Ferrieux, F. Forest. « Alimentations à découpage, convertisseurs à résonance ». Ed. Dunod.
- [II-7] Site internet : <http://www.avxcorp.com>.
- [II-8] A.F. Boehinger, « Self-adaptive DC converter for solar spacecraft power supply », *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, AES-4, n^o1, pp 102-111, 1968.
- [II-9] C. Alonso, B. Estibals, H. Valderrama-Blavi «An overview of MPPT controls and their future developments», *EPE-PEMC*, Dubrovnik, Croatia, septembre 2002.
- [II-10] C. Alonso, *L'électronique de puissance, vecteur d'optimisation pour les énergies renouvelables*, Ed. Novelect-ecrin, 2002.
- [II-11] A.S. Kislovski, «Power Tracking Methods in Photovoltaic Applications», *Power Conversion*, pp.513-528, 1993.
- [II-12] J-H-T Enslin, "Maximum Power Point Tracking : a cost saving necessity in solar systems", *Renewable energy*, vol. 2, n^o 6, 1992, pp. 543-549.
- [II-13] Choi K., "Application of the Maximum Power Point Tracking (MPPT) to the on-board adaptive power supply sub-system", CNES technical note, n^o 138, 1998.
- [II-14] Salameh Z., Taylor D., "Step-up maximum power point tracker for PV arrays", Proc. Of the 1988 annual meeting of the American Solar Energy Society, Cambridge, USA, 1988, pp. 409-414.
- [II-15] Matsui M., Kitano T., Xu D-H, Yang Z-Q, "A new maximum photovoltaic power tracking control scheme based on power equilibrium at DC link", *IEEE Industry Applications Conference*, vol. 2, 1999, pp. 804-809.
- [II-16] Hua C., Lin J., Shen C., "Implementation of a DSP controlled photovoltaic system with peak power tracking", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 45, n^o1, 1998, pp. 99-107.
- [II-17] Hussein K-H., Muta I., Hoshino T., Osakada M., "Maximum photovoltaic power tracking : an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions", *IEE proceedings on Gener. Transm. Distrib.*, Vol. 142, n^o 1, 1995, pp. 59-64
- [III-1] C. Alonso, A. Martinez, "Optimisation d'une chaîne de production d'électricité photovoltaïque", *rapport d'activité du programme CNRS/ECODEV-ADEME*, 1997.
- [III-2] C. Alonso, M.F. Shraif, A. Martinez, « Conception et réalisation d'une chaîne de production d'électricité photovoltaïque modulable », *Rapport de contrat région Midi-Pyrénées RECH 97001945*, Rapport LAAS 99 477, 1999.
- [III-3] Data Sheet : "BP-585F High Efficiency Monocrystalline PV Module", BP Solar.

- [III-4] D. Lagrange, A. Cid-Pastor, P. Marcoul, D. Médale, J-L. Rastoul, C. Alonso, « Système de mesure pour le banc de test solaire », Rapport LAAS 03215, 2003.
- [III-5] Site Internet : <http://ni.com>
- [III-6] A. Cid, V. Boitier, A. Martinez, « Première évaluation comparative de chargeurs de batteries pour systèmes photovoltaïques », *Rapport de contrat EDF*, (30 pages, 2002.
- [III-7] « Conception de centrales mixtes photovoltaïques-éoliennes optimisées, intelligentes et modulaires », *appel d'offre CNRS/ECODEV/ADEME*, 2000.
- [III-8] J. Richard, V. Boitier, X. Roboam, C. Alonso, « Générateur électrique modulaire photovoltaïque », *Rapport LAAS 02581*, 2002.
- [III-9] B. Multon, « L'énergie électrique : analyse des ressources et de la production, place des sources renouvelables », *Journées électrotechnique du club EEA*, 1999.
- [III-10] O. Gergaud, B. Multon, H. Ben Ahmed, « Modélisation d'un chaîne de conversion éolienne de petite puissance », *Electronique de Puissance du Futur*, EPF 2001, pp 17-22, 2001.
- [III-11] A. Mirecki, X. Roboam, S. boux, L. Marryo, « Optimisation de la conversion d'énergie pour une éolienne à axe vertical », *colloque GEVIQ'2002*, Marseille, pp. 72-77, 2002.
- [III-12] S. Boux de Casson, « Modélisation et simulation d'architectures de conversion de puissance associées à une commande MPPT destinées à l'optimisation de la production d'une éolienne », *rapport de Diplôme de Recherche Universitaire*, 2001.
- [III-13] L. Sifflet, « Contrôle de la tension d'un bus continu dans une architecture de véhicule électrique solaire », *rapport de DEA génie électrique*, ENSEEIHT, 2001.
- [III-14] TBCH-1206M Solar battery Controller Data Sheet, Terra Solar USA Inc.
- [III-15] D. Linden, "Handbook of Batteries", 2nd edition, Ed. Mc Graw and Hill, INC New York, 1995.
- [III-16] Unitrode Corporation, "Improved Methods for Charging Lead-Acid Batteries Using the UC3906, U-104 Application Note", *Unitrode Applications Handbook*, pp. 3-78 - 3-88, 1997.
- [III-17] Solar Lighting Controller Model LS-2, Product specification, SOLAR CONVERTERS Inc. Web Site : <http://www.solarconverters.com>
- [III-18] Manuel d'utilisation du régulateur SUNLINE PSC 15/25. ECOSOL SARL.
- [III-19] SOLAR BOOST™ 2000 Installation and operation Manual, *RV POWER PRODUCTS Inc.* Site Internet : <http://www.rvpowerproducts.com>
- [IV-1] A. Cid-Pastor, "Evaluation comparative de chargeurs de batteries pour systèmes photovoltaïques" Rapport de DEA de l'école Doctorale GEET, Toulouse, 2003.
- [IV-2] A. Salles, « Réalisation d'éléments de stockage magnétique pour convertisseurs statiques de faible puissance, destinés à la conversion d'énergie », Rapport de DEA de l'école Doctorale GEET, Toulouse, 2003.
- [IV-3] A-B. Frazier, R-O. Warrington, C. Friedrich, „The Miniaturization Technologies : Past, Present and Future”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 42, no 5, pp. 423430, 1995.
- [IV-4] F. Forest, « Electronique de puissance basse tension, haut rendement pour les applications portables », *Proceedings of Journées du Club EEA*, Paris, pp. 97-106, 2002.
- [IV-5] B. Estibals, « Conception, réalisation et caractérisation de micro-miroirs optiques à déflexion localisée appliqués aux télécommunications optiques », Thèse de l'INPT soutenue le 19 Décembre 2002.

- [IV-6] A. Lofti, F. Lee, "Design of high frequency hybrid power transformer", *Proceedings of IEEE International Workshop on Power Packaging (IWIPP)*, pp. 39-43, 1998.
- [IV-7] P. Gradzki, F. Lee, "Design of high-frequency hybrid power transformer", *Proceedings of 6th Annual VPEC Power Electronics Seminar*, pp. 319-326, 1988.
- [IV-8] S. Renard, B. Estibals, V. Gaff, « Optical MEMS Components become Key Players in Optical Networks », *Europhotonics*, n° April/May01, pp. 33-35, 2001
- [IV-9] M-F. Dautartas, A-m. Benzoni, Y-C. Chen, G-E. Blonder, B-H. Johnson, C-R. Paola, E. rice, Y-H. Wong, « A Silicon-Based Moving Mirror Optical Switch », *Journal of Lighthwave Technology*, vol. 10, no 8, pp. 1078-1085, 1992.
- [IV-10] M. Pai, N-C. Tien, "Polysilicon Actuated Micromirror for Large Matrix Optical Cross-Connects", *MOEMS 99*, pp. 30-33, 1999.
- [IV-11] G. Reyne, "Electromagnetic actuation for MOEMS : examples, advantages and drawbacks of MAGMAS", *Journal of Magnetism and Materials*, vol. 242-245, pp. 1119-1125, 2002.
- [IV-12] M. Hoffman, E. Vosges, "Bulk silicon micromachining for MEMS in optical communication systems", *Journal of Micromechanic and Microengineering*, vol. 12, pp. 349-360, 2002.
- [IV-13] T. Ono, *Sensors and Actuators*, vol. A21-A23, pp. 726-728, 1990.
- [IV-14] B. Estibals, C. Alonso, H. Camon, H. Valderrama-Blavi, L. Martinez-Salamero, "Hacia la alimentación integrada de microsistemas (i) : actuadores, generadores y motores", *Automatica e Instrumentacion*, no 344, pp. 2-11, 2003.
- [IV-15] J-P. Ferrieux, F. Forest, « Alimentations à découpage, convertisseurs à résonance : principe, composants et modélisation », Masson, 2^{ème} édition, 1994
- [IV-16] S. Tadigadapa, "Integration of micromachined devices and microelectronic circuits: techniques and challenges", *Proceedings of the 43rd IEEE Midwest Symposium on Circuits and Systems*, vol. 1, pp. 224-227, 2000.
- [IV-17] S. Raud, « Les Micro-sources d'énergie », *Etats-Unis Microélectronique*, n° 27, pp. 6-14, 2002.
- [IV-18] H.Hakim , J-P.Laur , J-L.Sanchez , E.Scheid , P.Dubreuil, "Nonlinear capacitors integration", *International Semiconductor Conference (CAS'2000)*, Sinaia (Roumanie), Vol.1,pp.303-306, 2000.
- [IV-19] G. Troussier & al., « Etude et réalisation d'éléments inductifs sur silicium dans la perspective d'intégration de micro-convertisseurs », EPF'2002, pp.191-196, 2002.
- [IV-20] A. Lotfi, R-B. Van Dover, L. Schneemeyer, M. Steigerwald, "Micro-transformer devices using thin-film electroplated deposition", *Proceedings of Power Electronics Specialists Conference 98*, vol. 2, pp 1511 –1515, 1998.
- [IV-21] B. Estibals, C. Alonso, M-F. Shraif, H. Valderrama-Blavi, H. Camon, A. Martinez, "Design and integration of photovoltaic switching conversion chains", 6th ESPC 2002, pp. 35-40, 2002.
- [IV-22] H-M. Greenhouse, "Design of Planar Rectangular Microelectronic Inductors", *IEEE Trans. Parts, Hybrid Packaging*, vol. PHP-10, n° 2, 1974.
- [IV-23] C-P. Yue, C. Ryu, J. Lau, T-H. Lee, S-S. Wong, "A physical model for planar spiral inductors on silicon", *Proc. Of IEEE Intern. Electron Devices Meeting*, San Fransisco, CA, 1996.
- [IV-24] Site Internet : <http://www.coventor.com/>